

**Univerzita Karlova**

**Přírodovědecká fakulta**

**Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a geofyziky**

Studijní program: Geologie  
Specializace: Užitá geofyzika



**Bc. Diana Konrádová**

Využití vrtných seismometrů pro studium útlumu seismických vln

Use of borehole seismometers for the study of seismic wave attenuation

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: prof. RNDr. Tomáš Fischer, Ph.D.

Praha, 2021

**Prehlásenie:**

Prehlasujem, že som záverečnú prácu spracovala samostatne a že som uviedla všetky použité informačné zdroje a literatúru. Táto práca ani jej podstatná časť nebola predložená k získaniu iného alebo rovnakého akademického titulu.

V Prahe, 25.08.2021

Podpis

## **PodĎakovanie**

Moje veľké podĎakovanie patrí môjmu školiteľovi prof. RNDr. Tomášovi Fischerovi, Ph.D. za cenné rady, pomoc a profesionálne vedenie počas písania tejto práce. Rovnako ďakujem Josefovi Vlčkovi, ktorý bol vždy ochotný zodpovedať všetky moje dotazy a v neposlednom rade aj svojej rodine a známym za to, že vo mňa verili.

## **Abstrakt**

Súčasná seizmická aktivita je najčastejšie zaznamenávaná seizmickými stanicami uloženými na zemskom povrchu. Avšak v priebehu posledných rokov dochádza v Českej republike k novým inštaláciám vrtných seizmometrov. V Hartoušově, nachádzajúcom sa v Západných Čechách, a v Litoměřicích boli v nedávnej minulosti vybudované monitorovacie seizmické vrty a nainštalované vrtné seizmometre. Na dáta získané z vrtných staníc v týchto oblastiach som aplikovala metódu spektrálneho pomeru, snažiac sa o pochopenie a upresnenie vplyvu pripovrchovej vrstvy. Dáta pochádzali z rôznych hĺbkových úrovní a rôznych geologických prostredí. Analýzou amplitúd som určila ich zosilnenie na povrchu a určením pomeru medzi signálom a šumom som dokázala, aký význam má využívať vrtné seizmometre k zlepšeniu citlivosti monitorovania. Následná spektrálna analýza slúžila nie len na porovnanie s teoretickými výsledkami, ale aj k určeniu faktoru kvality  $Q$  pripovrchovej vrstvy v Litoměřicích a v Hartoušově. Zhodnotené sú jeho hodnoty v rozsahu frekvencií 5 až 30 Hz, vplyv lokálnych efektov a geológie.

**Kľúčové slová:** Západné Čechy, Litoměřice, vrtné seizmometre, amplitúdy, útlm

## **Abstract**

Nowadays, the seismic activity is most often recorded by seismic stations on the surface of the Earth. Nevertheless, in the recent years, Czech Republic started installing the borehole seismometers. In Hartoušov in West Bohemia and Litoměřice, new monitoring seismic boreholes were built and borehole seismometers were installed. On data gathered by the seismometers in these areas, I have applied the spectral ratio method, in order to fully understand and further specify the influence of the near-surface layer. The data stemmed from various levels of depths and distinctive geological environments. Through the analysis of amplitudes, I defined their intensification on the surface and through the definition of the signal and noise ratio I showed what the significance of the use of borehole seismometers is in terms of improving the sensitivity of monitoring. The following spectral analysis served not only as a comparison with the theoretical outcomes, but also to determine the quality factor  $Q$  in the near-surface layer in Litoměřice and Hartoušov. Lastly, I evaluated the value of  $Q$  on the scale of 5 to 30 Hz, the influence of the local effects and geology.

**Key words:** West Bohemia, Litoměřice, borehole seismometers, amplitudes, attenuation

## Obsah

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Úvod   | 1  |
| 2     | Teoretické základy                                     | 2  |
| 2.1   | Amplitúdy seizmických vln                              | 2  |
| 2.1.1 | Amplitúdy na voľnom povrchu                            | 3  |
| 2.2   | Seizmický útlm   | 4  |
| 2.2.1 | Geometrické rozširovanie                               | 5  |
| 2.2.2 | Mnohocestné šírenie                                    | 5  |
| 2.2.3 | Útlm následkom rozptylu                                | 6  |
| 2.2.4 | Vnútorný útlm  | 6  |
| 2.2.5 | Q-faktor pre P a S-vlny                                | 8  |
| 3     | Metódy určovania útlmu                                 | 10 |
| 3.1   | Metóda spektrálneho pomeru                             | 10 |
| 3.1.1 | Metóda spektrálneho pomeru vo vrte                     | 10 |
| 3.1.2 | Metóda spektrálneho pomeru s použitím dvoch staníc     | 12 |
| 3.1.3 | Metóda spektrálneho pomeru s využitím viacerých staníc | 13 |
| 3.2   | Metóda s využitím coda vln                             | 14 |
| 3.3   | Merania s využitím povrchových vln                     | 14 |
| 4     | Krátka geológia oblasti                                | 15 |
| 4.1   | Geológia a profil vrtu PGVT-LT1 v Litoměřicích         | 16 |
| 4.2   | Geológia a profil vrtu HJB-1 v západných Čechách       | 17 |
| 5     | Dáta   | 18 |
| 6     | Postup práce   | 23 |
| 7     | Výsledky   | 26 |
| 7.1   | Zosilnenie amplitúd a SNR                              | 26 |

|     |                          |    |
|-----|--------------------------|----|
| 7.2 | Spektrálna analýza       | 35 |
| 7.3 | Útlm                     | 48 |
| 8   | Diskusia                 | 52 |
| 9   | Záver                    | 54 |
| 10  | Zoznam použitých zdrojov | 55 |
| 11  | Prílohy                  | 58 |

# 1 Úvod

V priebehu rokov nastalo v oblasti zaznamenávania seizmických javov s využitím vrtných seizmometrov výrazné zlepšenie. Postupne sa prichádza na nové využitia a spracovania takto získaných dát. Táto práca sa zameriava na dve rôzne oblasti v Česku, v ktorých sú testované záznamy seizmickej aktivity vrtnými seizmometrami. Prvou z nich je oblasť západných Čiech, ktorá je známa svojou aktivitou, spojenou s kvartérnym vulkanizmom, v podobe seizmických rojov. Tá sa deje opakovane v epicentrálnej zóne Nového Kostela a je sprevádzaná geodynamickým procesom, ktorým sú výrony CO<sub>2</sub>. Po zemetrasnom roji na prelome rokov 1985/86 sa začalo s inštaláciou hustej seizmickej siete WEBNET a v nedávnej dobe k seizmickým staniciam pribudli aj monitorovacie vrty, ktoré vedú k novým výskumom nie len v oblasti seizmicity.

Druhou oblasťou sú Litoměřice. Práve tam je vybudovaný geotermálny vrt s hĺbkou 2,1 km, spadajúci pod výskumnú infraštruktúru RINGEN a seizmická sieť pozostávajúca z ôsmich staníc. V roku 2020 bol o 85 m ďalej vybudovaný monitorovací seizmický vrt s hĺbkou 200 m. Väčšina seizmickej aktivity pochádza z necelých 200 km vzdialeného veľkolomu v Poľskom Lubine a zaznamenávané sú aj odpaly v blízkych lomoch.

Záznam s pomocou vrtných seizmometrov je realizovaný s cieľom zlepšenia pomeru SNR a rozšírenia frekvenčného rozsahu záznamu k vyšším frekvenciám. Táto práca je prvou prácou, ktorá sa zaoberá porovnaním amplitúdy a SNR na rôznych hĺbkových úrovniach a v rôznych geologických prostrediach vo vrte a na povrchu v týchto dvoch záujmových oblastiach. Cieľom tejto práce je oceniť prínos vrtných meraní, ich význam pre zvýšenie citlivosti monitorovania a upresnenie vplyvu pripovrchovej vrstvy v súvislosti s určením jej útlmu. Na oblasť Západných Čiech bolo publikovaných niekoľko článkov zaoberajúcich sa problematikou útlmu, ako napríklad Wcisło et al. (2018), ktorý sa v svojej práci zaoberal útlmom bez využitia vrtných seizmických staníc, využíval len dáta z povrchových staníc a neurčoval útlm pripovrchovej vrstvy. Ďalšiu štúdiu útlmu v západných Čechách vykonali Bachura a Fischer (2016), tí však využívali a analyzovali len vlny coda. Podobná štúdia však na oblasť Litoměřic doposiaľ nevznikla. V tejto práci som primárne vychádzala z článku Wang et al. (2016), ktorý využil geometrie seizmometrov vrt-povrch a pomocou spektrálnej analýzy určil útlm pripovrchovej vrstvy.



## 2 Teoretické základy

### 2.1 Amplitúdy seizmických vln

Hustota energie, ktorá je obsiahnutá v seizmickej vlne je súčet kinetickej a potencionálnej energie:

$$E = E_K + E_P \quad (1)$$

Potencionálna energia je vyjadrená vzťahom medzi napätím a deformáciou (pretvorením), ktorá sa dá zapísať nasledovne pomocou ich tenzorov  $\tau_{ij}$  a  $e_{ij}$ :

$$E_P = \frac{1}{2} \tau_{ij} e_{ij} \quad (2)$$

a vzťah na určenie kinetickej energie je:

$$E_K = \frac{1}{2} \rho [A \omega \cos(\omega t - kx)]^2 \quad (3)$$

kde  $\rho$  je hustota,  $A$  je amplitúda,  $\omega$  je uhlová frekvencia a  $k$  je vlnové číslo (Bormann et al., 2012). Po dosadení rovníc 2 a 3 do rovnice 1 zistíme, že priemerná hodnota hustoty energie je úmerná druhej mocnine amplitúdy a rovnako aj frekvencie. Z toho vyplýva, že vlny s vyššou frekvenciou majú väčšiu energiu ako tie s nižšou, aj keď majú rovnakú hodnotu amplitúdy (Shearer, 2009).

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 \quad (4)$$

Pre ďalší popis a pochopenie amplitúd je potrebné zaviesť pojem hustoty toku energie. Tá je v smere propagácie vlny za jednotku času na jednotku plochy vyjadrená:

$$E_{flux} = \frac{1}{2} c \rho A^2 \omega^2 \quad (5)$$

kde  $c$  predstavuje rýchlosť P alebo S vlny (Bormann et al., 2012). Ak uvážime tok energie na malej ploche  $dS$  vlnoplochy, ktorá sa v čase môže meniť a to, že smer pohybu energie je pozdĺž paprsku, tak tento tok energie ostáva konštantný. Za predpokladu, že rýchlosť a hustota sú konštantné, potom pre dve rôzne plochy  $dS_1$  a  $dS_2$  platí:

$$\frac{A_2}{A_1} = \sqrt{\frac{dS_1}{dS_2}} \quad (6)$$

Amplitúda rastie, ak sa vlnoplocha koncentruje do menšej plochy a naopak klesá, ak sa rozširuje. Toto odvodenie slúži ako základ pre správne pochopenie geometrického rozširovania. V prípade, že hustota a rýchlosť sa v smere propagácie paprsku líšia, ale nebudeme brať do úvahy geometrické rozširovanie ( $dS_1 = dS_2$ ), tak vzťah vyjadrujúci amplitúdy bude mať tvar:

$$\frac{A_2}{A_1} = \sqrt{\frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}} \quad (7)$$

a teda pomer amplitúd je rovný pomeru druhých mocnín akustických impedancií (Shearer, 2009). Z rovnice 7 vyplýva, že amplitúdy sa budú zväčšovať pri prechode seizmického paprsku do prostredia s menšou hustotou a menšou rýchlosťou. Takýmto prostredím sú napríklad sedimenty.

### 2.1.1 Amplitúdy na voľnom povrchu

Väčšina seizmologických meraní sa uskutočňujú na voľnom povrchu alebo v jeho blízkom okolí a preto je podstatné chápať aký má vplyv na uskutočnené merania. V takomto prostredí pozorujeme vlny dopadajúce a odrazené. Ku príkladu, odrazené SH-vlny majú rovnakú amplitúdu ako vlny dopadajúce a tým sa ich amplitúda na povrchu zväčší. Veľkosť tohoto zosilnenia je ovplyvnená typom dopadajúcej vlny a uhlom dopadu (Lay and Wallace, 1995). V prípade, že budeme pozorovať chovanie vlny na povrchu a vo vrte, tento jednoduchý fakt nemusí platiť a to z dôvodu, že by sme neboli schopný odlíšiť energiu SH-vlny, ktorá smeruje nahor a ktorá nadol. V prípade snímača, ktorý sa nachádza v malej hĺbke to je ešte komplikovanejšie. Totižto signál prichádzajúci na takýto snímač zaznamená vlny, ktoré interferujú v smere propagácie nahor aj nadol (Shearer and Orcutt, 1987).

Celkom inak to platí pre P a SV-vlny. V tomto prípade je problém komplikovanejší, pretože P-vlna dopadajúca na voľný povrch generuje dve odrazené vlny. Jednu P a druhú SV. Avšak pre kolmý dopad P-vlny na rozhranie platí, že sa nebude žiadna SV-vlna generovať. V tejto práci je dôležité spomenúť práve tento prípad, keďže predpokladáme, že vlna prechádzajúca vrtom k seizmometru na povrchu je vertikálna. Posunutie je v smere z a pomer tohto posunutia odrazenej P-vlny k dopadajúcej závisí na rozdielu impedancií a je vyjadrený nasledovne:

$$\frac{(u_z)_R}{(u_z)_I} = R_{12} = \frac{\rho_1 \alpha_1 - \rho_2 \alpha_2}{\rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2} \quad (8)$$

Pomer transformovanej P-vlny k dopadajúcej je zas vyjadrený nasledovne (Stein and Wysession, 2003):

$$\frac{(u_z)_T}{(u_z)_I} = T_{12} = \frac{2\rho_1 \alpha_1}{\rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2} \quad (9)$$

$R_{12}$  je označenie pre koeficient odrazu a  $T_{12}$  je koeficient priechodu. Z rovnice 8 a 9 je vidieť ich závislosť na hustote prostredia a rýchlosti šírenia P-vlny. Ich vzájomný vzťah je rovný (Stein and Wysession, 2003):

$$1 + R_{12} = T_{12} \quad (10)$$

Keďže v mojej práci uvažujem prostredie vrtu s voľným povrchom, tak koeficient priechodu je rovný 0, pretože nedochádza k transformácii P-vlny, ale len k jej odrazu. Koeficient odrazu sa tým pádom rovná hodnote -1. Vlna sa vrtom šíri smerom nahor, takže jej polarizácia je kladná v smere šírenia, práve v tomto smere. Po odrazení vlny od rozhrania sa začne šíriť smerom nadol a kladný smer bude opačný, čiže proti smeru šírenia. Vlna je stále polarizovaná smerom nahor a nastane jav, že na povrchu zaznamenáme dvoj násobnú amplitúdu, pretože amplitúdy dopadajúcej a odrazenej vlny sa sčítajú.

## 2.2 Seizmický útlm

Základom k správne mu pochopeniu seizmického útlmu je rozlíšenie jednotlivých príčin, ktoré môžu za pokles amplitúdy seizmickej vlny. Sú to:

- I. geometrické rozširovanie
- II. odraz a transformácia vln na geologických rozhraniach (angl. scattering attenuation)
- III. mnohocestné šírenie seizmickej vlny
- IV. strata energie zapríčinená anelasticitou prostredia v dôsledku vnútorného trenia (angl. intrinsic attenuation)

Prvé tri príčiny popisuje teória elastických vln a zmena amplitúdy je spôsobená premiestením energie v rámci vlnového poľa. V poslednom prípade tomu tak nie je, pretože zmena amplitúdy je dôsledok straty energie elastických vln.

### 2.2.1 Geometrické rozširovanie

Mechanická energia propagujúca zo zdroja sa šíri ako vlnoplocha. Jej plocha rastie so zväčšujúcou sa vzdialenosťou a energia  $E(r)$  vo vzdialenosti  $r$  od miesta vzniku je daná ako:

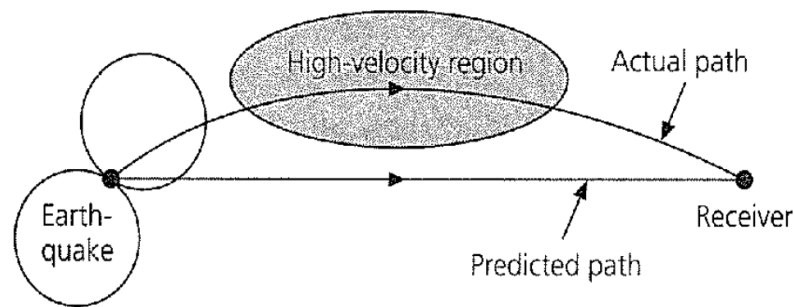
$$E_{(r)} = E_0/4\pi r^2 \quad (11)$$

Pre sférickú vlnoplochu platí, že jej plocha rastie s druhou mocninou vzdialenosti a plocha cylindrickej vlnoplochy rastie len so vzdialenosťou  $r$  (Stein and Wysession, 2003).

Keďže veľkosť seizmickej energie klesá úmerne s druhou mocninou vzdialenosti a energia je úmerná druhej mocnine amplitúdy, tak pokles amplitúdy objemových vln je úmerný  $1/r$ . Obdobne to platí pre povrchové vlny. V tomto prípade je pokles amplitúdy úmerný  $1/\sqrt{r}$ . Preto je možné na seizmických záznamoch vidieť rýchlejší útlm objemových vln, než povrchových (Aki and Richards, 2002).

### 2.2.2 Mnohocestné šírenie

Seizmické vlny sú zaostrované a rozostrované v dôsledku rýchlostných heterogenít a to má za následok zmeny veľkostí ich amplitúd. Už malé rýchlostné heterogenity v blízkosti zdroja zemetrasenia môžu spôsobiť vo veľkej vzdialenosti od neho veľké zmeny. To komplikuje interpretáciu seizmických dát a na Obrázku 1 je ilustrovaný príklad chyby, ktorá môže nastať. V prípade, že by sa oblasť vysokých rýchlostí nebrala pri interpretácii dát do úvahy, malo by to za následok, že výsledný útlm bude podstatne menší než v skutočnosti je (Stein and Wysession, 2003).



Obrázok 1: Grafické znázornenie efektu mnohocestného šírenia seizmickej vlny (Stein and Wysession, 2003).

### 2.2.3 Útlm následkom rozptylu

Na rozhraní dvoch prostredí, v ktorých sa líšia rýchlosti šírenia seizmickej vlny dochádza pri dopade vlny na dané prostredie k odrazu alebo lomu. Tým dôjde k rozdeleniu energie. K poklesu amplitúdy priamej vlny dôjde aj v dôsledku rozptylu spôsobeného malými heterogenitami. Na záznamoch z lokálnych zemetrasení, ktoré sú silno ovplyvnené rozptylom na nehomogenitách v zemskej kôre je tento druh útlmu dominantný, ale od ostatných sa líši v tom, že energia v celom vlnovom poli ostane konštantná (Shapiro and Kneib, 1993). Najčastejším spôsobom určenia rozptylu je použitie coda vln.

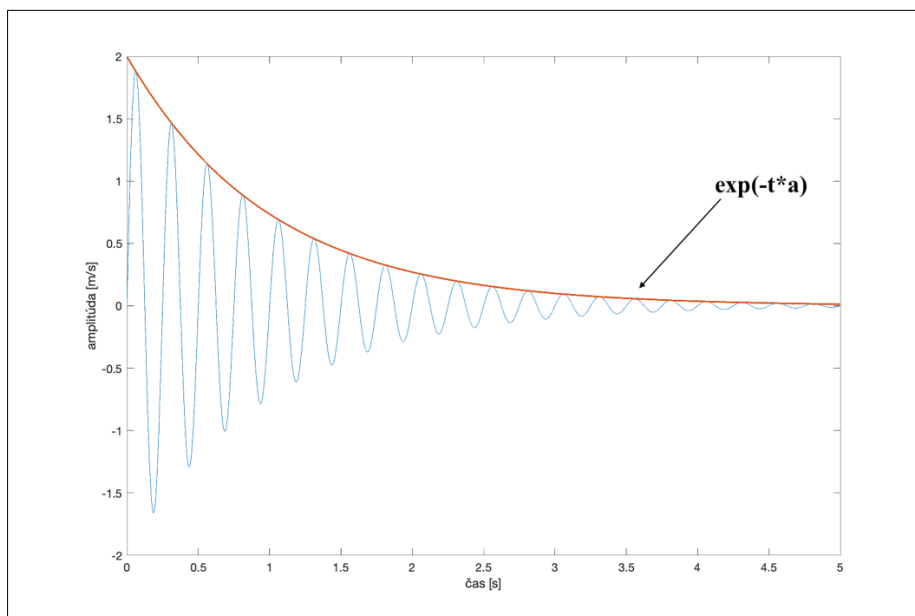
### 2.2.4 Vnútorý útlm

Na rozdiel od útlmu spôsobeného rozptylom, dochádza v tomto prípade k strate mechanickej energie vlny. To je spôsobené premenou energie na teplo pri vnútornom trení, kedy sa potencionálna energia premení na energiu kinetickú. To závisí od štruktúry kryštálov v mineráloch, prítomnosti vody v hornine alebo trhlín.

Popisuje ho hodnota  $Q$ , nazývaná faktor kvality (angl. quality factor). Je to bezrozmerná veličina, ktorá je definovaná ako pomer medzi maximom energie a stratou energie počas jedného cyklu deformácie. Možno ho vyjadriť nasledovne (Shearer, 2009):

$$\frac{1}{Q(\omega)} = -\frac{\Delta E}{2\pi E} \quad (12)$$

kde  $E$  predstavuje energiu na začiatku cyklu a  $-\Delta E$  predstavuje stratu energie. Inverzná hodnota faktoru kvality  $Q^{-1}$  sa vo viacerých publikáciách označuje ako útlm a priamo súvisí s tým, ako veľmi je v geologickom prostredí vlna utlmená (Obrázok 2).



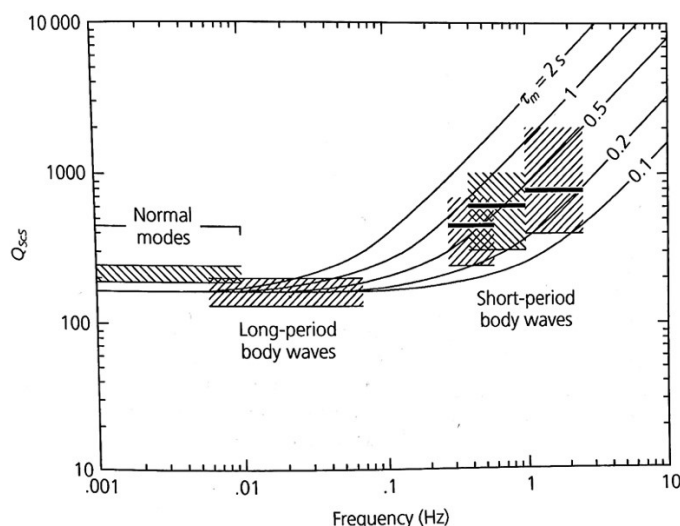
Obrázok 2: Príklad jednoduchého utlmeného signálu s frekvenciou 4 Hz a koeficientom útlmu  $a$ . Červenou farbou je znázornená obálka signálu predstavujúca tlmenie.

Z rovnice 12 preto jasne vyplýva, že prostredie v ktorom je strata energie  $\Delta E$  blízka nule, sa hodnota  $Q(\omega)$  blíži k nekonečnu a útlm takéhoto prostredia je minimálny. Naopak, ak  $\Delta E$  nadobúda vysokých hodnôt,  $Q$  bude nízke a útlm prostredia je veľký. Pre praktické použitie v seizmológii je vhodnejšie použiť vzťah, ktorý vyjadruje amplitúdu  $A$  závislú na vzdialenosti (Shearer, 2009):

$$A(x) = A_0 e^{-\omega x / 2cQ} \quad (13)$$

kde  $x$  predstavuje vzdialenosť a  $c$  rýchlosť. Tá sa rozlišuje podľa toho o aký typ vlny sa jedná. Pre P-vlny sa značí  $\alpha$  a pre S-vlny ako  $\beta$ . Z rovnice 13 je patrné, že pri vyšších frekvenciách je strata energie väčšia. Môže za to fakt, že vlna s vysokou frekvenciou prechádzajúca prostredím prejde jednotlivými osciláciami rýchlo za sebou a stráca pri tom energiu rýchlejšie. Tento jav je viditeľný na seizmických záznamoch, kedy vysokofrekvenčná zložka vlny prichádzajúcej z veľkej vzdialenosti úplne vymizne. To znamená, že pre konštantné  $Q$  sa vysokofrekvenčná vlna utlmí rýchlejšie než

nízko-frekvenčná (Lay and Wallace, 1995). Pre nízke hodnoty frekvencií v rozmedzí od 0,001 až 0,1 Hz sa ukázalo, že je  $Q$  frekvenčne nezávislé, ale následne na vyšších frekvenciách je  $Q$  frekvenčne závislé a s rastúcou frekvenciou sa útlm zvyšuje (Obrázok 3) (Stein and Wysession, 2003).



Obrázok 3: Frekvenčná závislosť faktora kvality  $Q$  určeného zo seizmických vĺn šíriacich sa v Zemi. Vyšrafované oblasti značia reálne pozorovania. Je vidieť, že v rozsahu frekvencií od 0,001 až 0,1 Hz je  $Q$  konštantné (Lay and Wallace, 1995).

Rovnicu 13 je možné mierne upraviť a rozšíriť o imaginárnu časť. Tým sa získa rovnica pre výpočet amplitúdy harmonických vĺn (Shearer, 2009):

$$A(x, t) = A_0 e^{-\omega x / 2cQ} e^{-i\omega(t - \frac{x}{c})} \quad (14)$$

Reálna časť rovnice 14 predstavuje pokles amplitúdy v dôsledku útlmu a imaginárna časť oscilácie.

## 2.2.5 Q-faktor pre P a S-vlny

Útlm je v paprskových metódach často vyjadrovaný pomocou operátora útlmu  $t^*$  (Shearer, 2009):

$$t^* = \int_{\text{zdroj}}^{\text{prijímač}} \frac{dt}{Q(r)} \quad (15)$$

kde  $r$  predstavuje polohový vektor a hodnota  $1/Q$  sa integruje cez dráhu paprsku. Pre P-vlny je typická hodnota  $t^*$  asi jedna sekunda, pre S-vlny štyri sekundy a všeobecne platí, že  $t^*$  sa zväčšuje so zväčšujúcou sa vzdialenosťou. Avšak v niektorých prípadoch toto tvrdenie neplatí. Je tomu napríklad v prípade, ak vlna pochádzajúca z hlbšieho zdroja prejde astenosférou len raz a jej hodnota  $t^*$  bude nižšia než  $t^*$  vlny, ktorej zdroj je blízko k povrchu (Stein and Wysession, 2003).

Dosadením rovnice 15 do rovnice 13 a upravením sa dostane vzťah:

$$A(\omega) = A_0(\omega)e^{-\frac{\omega t^*}{2}} \quad (16)$$

Je potrebné si uvedomiť, že útlm P-vln  $Q_\alpha$  a útlm S-vln  $Q_\beta$  sa od seba líšia. Indexom  $\alpha$  sa značí rýchlosť P-vlny a indexom  $\beta$  rýchlosť S-vlny. Podľa vzťahov (Bormann et al., 2012):

$$Q_\mu = Q_\beta \quad (17)$$

$$\frac{1}{Q_\alpha} = \frac{4\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2}{3Q_\mu} + \left[1 - \frac{4\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2}{3}\right]/Q_\kappa \quad (18)$$

útlm pozdĺžnych vln priamo súvisí so strižným útlmom a objemovým útlmom. Útlm strižných vln len so strižným útlmom. V Zemi je objemový útlm veľmi slabý a jeho hodnota  $Q_\kappa$  je blízka nekonečnu, s výnimkou pre vnútorné jadro. Ak budeme uvažovať, že  $\lambda=\mu$ , tak vzťah medzi  $Q_\alpha$  a  $Q_\beta$  bude (Udías, 2000):

$$Q_\alpha = 2,25Q_\beta \quad (19)$$

Strižný útlm je najsilnejší vo vrchnom plášti a vnútornom jadre. S ohľadom braným na rýchlostný model Zeme PREM,  $Q_\mu$  nadobúda hodnoty 600 pre hĺbky do 80 km. Pre hĺbky od 80 do 220 km sa zníži  $Q_\mu$  na 80 a opäť sa zvýši na 143 pre hĺbky od 220 do 670 km. Pre spodný plášť v hĺbke pod 670 km nadobúda hodnoty 312 (Bormann et al., 2012).



### 3 Metódy určovania útlmu

Na určenie seizmického útlmu sa využívajú veľmi podobné dáta ako napríklad na výpočet a štúdium seizmických rýchlostí. Využívajú sa oscilácie (vlastný mód), povrchové vlny (globálne aj regionálne) a objemové vlny P a S (globálne aj regionálne).

Napríklad na dlhých periódach možno určiť  $Q$  z analýzy normálnych módov Zeme za použitia poklesu harmonických funkcií. Ak by sme mali čisto sinusoidný signál, tak útlm spôsobí rozširovanie čiarového spektra. Tým sa  $Q$  určí z šírky spektrálneho píku. To možno aplikovať na 1-D alebo 3-D modely útlmu (Shearer, 2019).

#### 3.1 Metóda spektrálneho pomeru

To či je hodnota  $Q$  pripovrchovej vrstvy frekvenčne závislá alebo nie, je stále otázkou mnohých diskusií. Jedným z výsledkov môže byť fakt, že  $Q$  je frekvenčne závislé pod 10 Hz. Ak je  $Q$  frekvenčne nezávislé, tak spektrálny pomer dvoch meraní v rôznych hĺbkach bude mať lineárny sklon na log-lineárnom grafe (Abercrombie 1997). Modely ukazujú, že lineárna povaha logaritmického spektrálneho pomeru sa objavuje vo frekvenčnom pásme od 2 do 40 Hz a frekvenčná závislosť  $Q$  v tomto pásme je nízka (Obrázok 4 – spodná časť). Tento fakt potvrdila aj štúdia Wang et al. (2016), ktorá využila túto metódu na určenie  $Q$  z dát nameraných vo vrte. Výhodou použitia spektrálneho pomeru je, že sa tým eliminujú nejasnosti efektu zdroja.

##### 3.1.1 Metóda spektrálneho pomeru vo vrte

Wang et al. (2016) vo svojej práci, z ktorej vychádza aj táto diplomová práca, používali len vlny, ktorých uhol dopadu bol menší než  $35^\circ$ , aby sa tým zaistilo to, že konkrétny paprsok vlny prešiel seizmometrom vo vrte a na povrchu. Ďalšou podmienkou bol veľký pomer signálu a šumu (SNR).

V metóde je využité spektrum zrýchlenia seizmických vĺn vo vzdialenej zóne, ktoré je definované ako:

$$A(f) = (2\pi f)^2 \Omega_0 \frac{f_c^2}{f^2 + f_c^2} e^{-\pi f t^*} \quad (20)$$

kde  $f$  je frekvencia,  $f_c$  rohová frekvencia,  $\Omega_0$  predstavuje dlho-periodickú hodnotu plata a  $t^*$  je operátor útlmu. Ten je vyjadrený z rovnice 15. Výpočet  $t_1^*$ , hodnoty operátoru útlmu na povrchu, je zapísaný nasledovne:

$$t_1^* = t_2^* + \frac{t_{2-1}}{Q} \quad (21)$$

pričom  $t_2^*$  je hodnota pozorovaná vo vrte a  $t_{2-1}$  je čas priechodu vlny od snímača z vrtu k snímaču na povrchu. Rovnica 18 sa dá ďalej upraviť:

$$t_1^* - t_2^* = \frac{t_{2-1}}{Q} \quad (22)$$

Z rovnice 20 je určený logaritmus spektrálneho pomeru medzi signálmi z vrtu a povrchu. Je vyjadrený v tvare rovnice priamky  $y=a-bx$ . Pre jednotlivé javy platí:

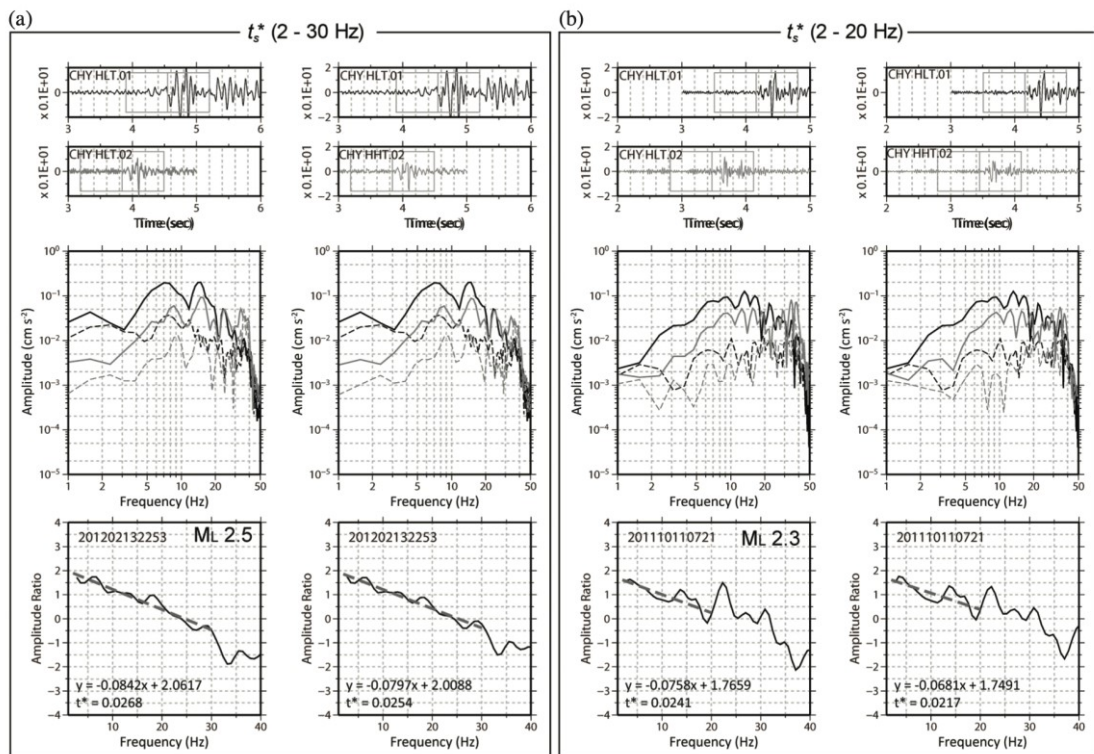
$$\ln(R(f)) = \ln(A) - \pi f(t_1^* - t_2^*) \quad (23)$$

Operátor útlmu  $t_1^* - t_2^*$ , respektíve  $t^*$ , je určený zo sklonu regresnej priamky. Tá je vykreslená do grafu znázorňujúceho spektrálny pomer amplitúd signálu medzi vrtom a povrchom a jeho závislosti na frekvencii (Obrázok 4 – spodná časť). Rozdiel  $t_1^* - t_2^*$  predstavuje samotné  $t^*$ . Po zistení rozdielu časov priechodu vlny od snímača vo vrte k povrchu  $t_{2-1}$  a známeho  $t^*$  sa útlm pripovrchovej vrstvy  $Q$  určí nasledovne:

$$\frac{t_{2-1}}{t^*} = Q \quad (24)$$

Obrázok 4 zobrazuje spektrálnu analýzu S-vlny jednej dvojice seizmometrov vrt-povrch. Z tej bolo zistené, že na frekvenciách vyšších ako 30 Hz dochádza k interferencii signálu a šumu. Z toho vyplýva, že zaznamenaná frekvencia použitá na regresnú analýzu musela byť v rozmedzí od 2-30 Hz. Avšak bez ohľadu na použité frekvenčné pásmo (4 pre každý typ vlny), výsledné hodnoty  $t^*$  boli skoro rovnaké a z tých je nakoniec možné odvodiť

samotný faktor kvality  $Q$  daného prostredia podľa postupu popísaného vyššie.



Obrázok 4: Příklad metódy spektrálneho pomeru. Na vrchu je vyznačené časové okno signálu a šumu. V strede je spektrum signálu (plnou čiarou) a spektrum šumu (čiarkovane). Dole je zobrazený log pomer spektra voči frekvencii s vyhovujúcou regresnou priamkou (Wang et al., 2016).

### 3.1.2 Metóda spektrálneho pomeru s použitím dvoch staníc

V predošlých kapitolách bolo vysvetlené, čo môže za skutočnosť, prečo sa amplitúdy zaznamenaných seizmických vln na dvoch staniciach v rôznych vzdialenostiach od zdroja, budú líšiť. Tieto amplitúdy sa vyjadria nasledovne (Havskov and Ottemoller, 2010):

$$A_1(f, t_1) = t_1^{-\beta} A_0 e^{-\pi f \kappa} e^{\frac{-\pi f t_1}{Q(f)}} \quad (25)$$

$$A_2(f, t_2) = t_2^{-\beta} A_0 e^{-\pi f \kappa} e^{\frac{-\pi f t_2}{Q(f)}} \quad (26)$$

Ak považujeme poklesový faktor spektra  $\kappa$  za konštantnú hodnotu, tak pomer týchto amplitúd sa využije k zisteniu  $Q$ , ktoré je frekvenčne závislé, nasledovne:

$$\frac{A_2(f, t_2)}{A_1(f, t_1)} = \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{-\beta} e^{\frac{-\pi f (t_2 - t_1)}{Q(f)}} \quad (27)$$

$$Q(f) = \frac{-\pi f(t_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{A_2(f, t_2)}{A_1(f, t_1)}\right) + \beta \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \quad (28)$$

Táto metóda závisí od absolútnych amplitúd, takže odozva prístroja musí byť na oboch staniciach rovnaká. Ak tomu tak nie je, je potrebná korekcia. Stanovenie frekvenčne závislej hodnoty  $Q$  ovplyvňuje aj prítomnosť sedimentov a mäkkej zeminy pri povrchu zeme. Kvôli tomu dochádza v takomto geologickom prostredí pri povrchu k zvýšeniu amplitúdy.

Metóda spektrálneho pomeru má niekoľko úskalí. Problémy môžu nastať pri analýze fázy P a obdobne S. Na vzdialenejšej stanici pozorujeme vlny  $P_n$ , na bližšej vlny  $P_g$  a tým pádom sa dráhy paprskov budú líšiť. V prípade geometrického rozširovania, ktoré bolo popísané v kap. 2.2.1 ako pomer  $1/r$  nemusí tento vzťah platiť a môže byť dokonca frekvenčne závislý. Aby sa predišlo nerelevantným výsledkom, je lepšie použiť na analýzu dáta z viac ako dvoch staníc.

V prípade, že budeme  $Q$  považovať za frekvenčne nezávislé, tak pomer amplitúd je zapísaný takto (Havskov and Ottemoller, 2010):

$$\frac{A_2(f, t_2)}{A_1(f, t_1)} = \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{-\beta} e^{\frac{-\pi f(t_2 - t_1)}{Q}} \quad (29)$$

Logaritmus spektrálneho pomeru je lineárne úmerný frekvencii a  $Q$  sa určí zo sklonu krivky zobrazujúcej prirodzený logaritmus pomeru amplitúd  $A_1$  a  $A_2$  ku frekvencii.

### 3.1.3 Metóda spektrálneho pomeru s využitím viacerých staníc

Na rozdiel od metódy, ktorá využíva len dve stanice, je táto metóda presnejšia, kvôli tomu, že do úvahy sa berú aj lokálne geologické podmienky na stanici nazývané ako lokálne efekty. To je zahrnuté vo vzorci 30 ako  $L_i(f)$  na stanici  $i$  (Havskov and Ottemoller, 2010).

$$\ln(A_{ki}(f, t_{ki})) = \ln(A_{0k}(f)) - \beta \ln t_{ki} + \ln L_i(f) - \frac{t_{ki} f \pi}{Q(f)} \quad (30)$$

Vzorec 30 vychádza zo vzorca 25, kde  $A_{ki}(f, t)$  predstavuje spektrálnu amplitúdu konkrétnej fázy v čase pozorovania  $t_{ki}$ . Výsledkom bude jedna rovnica pre každý staničný pár a jav, celkovo sa teda získa sústava lineárnych rovníc. Tá sa rieši štandardnými postupmi a to vedie k určeniu  $Q(f)$ . Využiť sa môžu vlny P, S a rovnako aj  $L_g$ .

### 3.2 Metóda s využitím coda vln

Vlny, ktoré prichádzajú na záznam ako posledné, po povrchových  $L_g$  vlnách, sa nazývajú coda vlny. Ich zdrojom sú lokálne zemetrasenia a sú charakteristické exponenciálnym poklesom amplitúdy v čase. Tento útlm je spôsobený anelasticitou prostredia ( $Q_i$ ) a rozptylom vln ( $Q_s$ ). Jeho faktor kvality sa značí  $Q_c$  a zahŕňa práve tieto efekty (Udías, 2000):

$$\frac{1}{Q_c} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_s} \quad (31)$$

V priebehu rokov vzniklo viacero modelov vzniku coda vln. Problémom však bolo, že niektoré modely popisovali prostredie, v ktorom nebol zastúpený jeden z efektov útlmu, a to anelasticita alebo rozptyl. Tým je napríklad difúzny model. Neskôr vznikli modely viacnásobného odrazu a energetického toku, ktoré už berú do úvahy oba efekty. Hlbšia analýza týchto modelov je pre túto prácu irelevantná, ale je to spomenuté kvôli faktu, že následné spracovanie dát závisí na vybratom modeli.

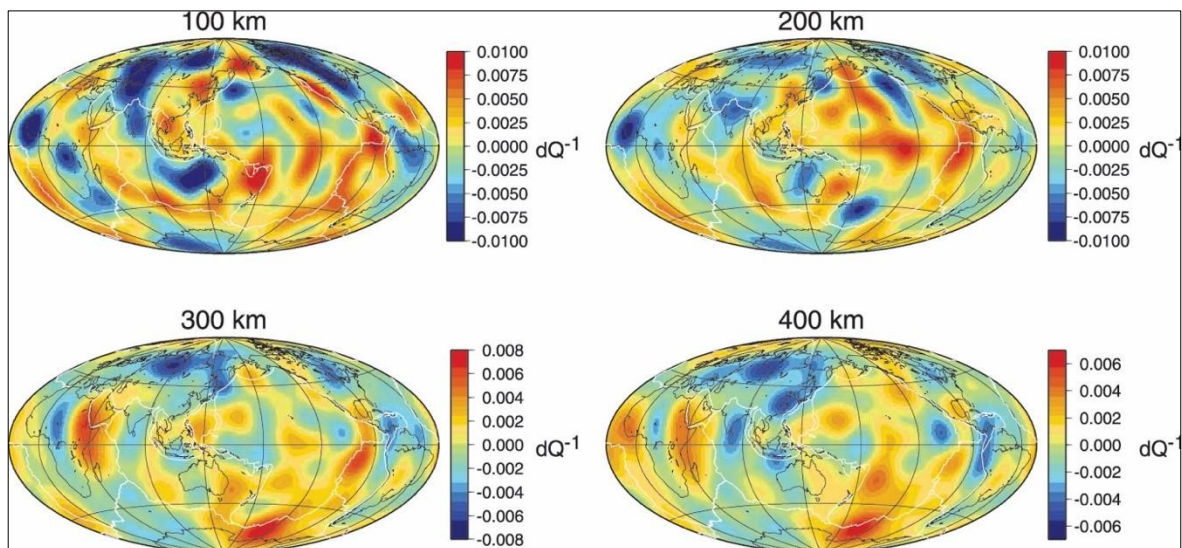
Jednou z možností spracovania dát a určenia útlmu je metóda „Multiple lapse time window analysis“ alebo metóda normalizácie cody (Bachura and Fischer, 2016).

### 3.3 Merania s využitím povrchových vln

Merania útlmu z povrchových vln a rovnako aj ostatné merania vychádzajú zväčša z meraní veľkostí amplitúd. Yang a Forsyth (2008) boli schopní vo svojej štúdii z tohto typu vln určiť vertikálne zmeny  $Q_\mu$  vo vrchnom plášti. Avšak toto meranie v regionálnej oblasti môže byť komplikované z dôvodu rozlíšenia efektov vnútorného útlmu na veľkosť amplitúdy od iných efektov ako sú rozptyl alebo zaoštrovanie a rozostrovanie energie spôsobené elastickými heterogenitami. Problém môže nastať aj pri strate energie spôsobenej útlmom, kedy vlna prechádza regionálnou oblasťou záujmu a jej strata energie je malá a vlnová dĺžka je rovnakého rádu ako rozmery záujmovej oblasti.

S využitím povrchových vln vzniklo v priebehu rokov niekoľko štúdií o 3-D globálnom útlme, napríklad Dalton a Ekström (2006). Jeden z výsledkov útlmu získaného z povrchových vln je ilustrovaný na Obrázku 5. Obmedzením týchto modelov je to, že berú

do úvahy na určenie útlmu len efekty rozptylu, ale efekty zaostrovania/rozostrovania energie od heterogenít malých rozmerov do úvahy neberú.



Obrázok 5: Ukážka výsledkov určenia globálneho útlmu z povrchových vĺn v rôznych hĺbkach pod povrchom (Dalton et al., 2008).

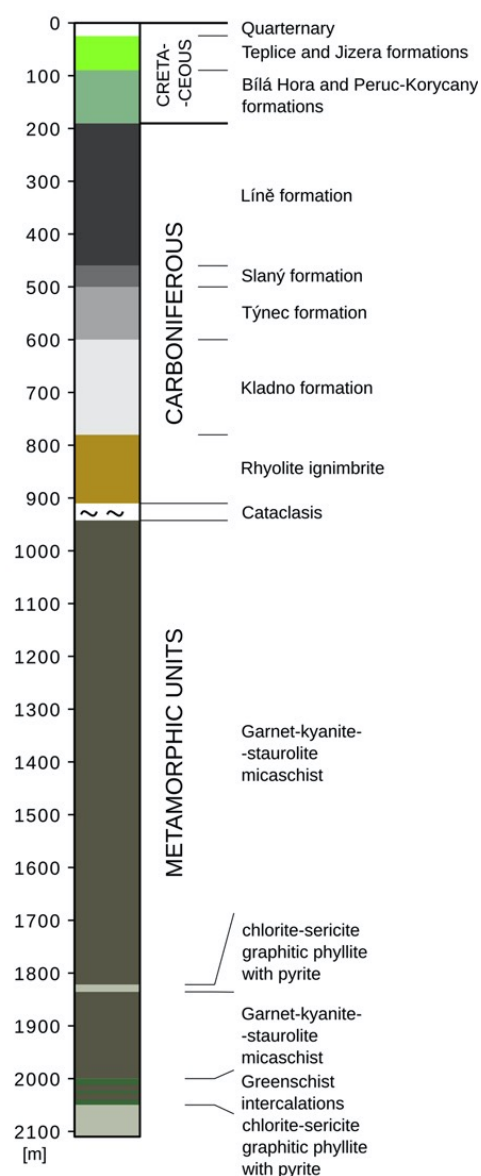
#### 4 Krátka geológia oblasti

Každý seizmický záznam je ovplyvnený pripovrchovými sedimentárnymi a zvetranými vrstvami. Tie majú efekt na samotný útlm alebo zosilnenie vĺn v takýchto vrstvách. Je to pripisované takzvaným lokálnym efektom, alebo presne povedané, samotnej geológii miesta, v ktorej je seizmometer uložený. Hlavnými faktormi na popis lokálnych efektov je faktor kvality  $Q$  a rýchlosť.

## 4.1 Geológia a profil vrtu PGVT-LT1 v Litoměřicích

Litoměřice sa nachádzajú v geologickej oblasti Českého masívu, ktorý je troskou európskeho variského orogénu, teda variscid. Z regionálneho hľadiska týkajúceho sa geológie je táto oblasť veľmi rôznorodá. Najspodnejšia časť je tvorená variskými horninami saxothuringika a tepelsko-barrandienskej jednotky (Mlčoch and Konopasek, 2010). Na nich sa nachádzajú mladšie sedimentárne uloženiny Českej kriedovej panvy alebo terciérne vulkanity (Šafanda et al., 2020).

Vrchná časť vrtu od povrchu do hĺbky 190 m je tvorená kriedovými plytkými morskými sedimentami. Sú tvorené formáciami Jizerskými, Bělohorskými a Perucko-Rokycanskými. V hĺbke od 190 do 780 m sa nachádzajú kontinentálne siliciklastické sedimenty Línskej, Slanej, Týnskej a Kladenskej formácie spadajúce do obdobia vrchného karbónu až spodného permu. Medzi hranicou podložia a sedimentov, v hĺbke 780-900 m, je vrstva ryolitových ignimbritov, ktoré sú tektonicky narušené a alterované. Podložie je tvorené svormy (Šafanda et al., 2020). Snímač sa nachádza práve v tejto vrstve. Profil s presnými popismi je zobrazený na Obrázku 6. Profil vrtu, v ktorom je uložený druhý snímač a nachádza sa tam stanica GLT2 nebol nikdy vytvorený, ale keďže sa nachádza vzdušnou čiarou len 85 m od hlbokého vrtu, tak uvažujem geologické prostredie rovnaké ako v prípade vrtu PGVT-LT1.



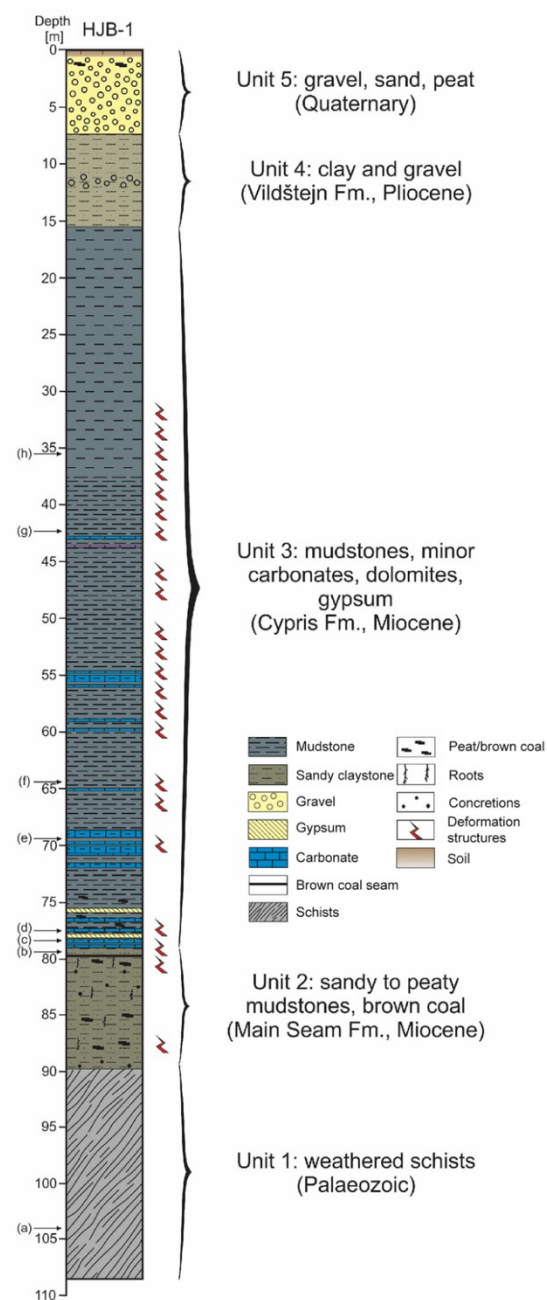
Obrázok 6: Profil vrtu PGVT - LT1 v Litoměřicích (Šafanda et al., 2020).



## 4.2 Geológia a profil vrtu HJB-1 v západných Čechách

Vrt v Hartoušově sa nachádza v Českom masíve, konkrétne v jeho západnej až severozápadnej časti zvanej saxothuringikum. Počas alpínskeho horotvorného procesu došlo k nahromadeniu tektonického napätia a tým k vzniku poklesu, ktorý sa nazýva oherský rift. Z pohľadu regionálnej geológie sa vrt nachádza v Chebskej panvy, ktorá vznikala počas terciéru, na krížení tektonickej štruktúry oherského riftu a chebsko-domažlického grabenu. Z východu je panva ohraničená mariánsko-lázeňským zlomom. Výplň tvoria terciérne a kvartérne sedimenty dosahujúce mocnosti 300 metrov. (Fischer et al., 2014). Oblasť západných Čiech, konkrétne Nového Kostela, ktorý sa nachádza v Chebskej panvy, je známa výskytom seizmických rojov. Tie vznikajú v zlomovej zóne Počátky-Plesná, v epicentrálnej oblasti Nového Kostela, ktorú pretína mariánsko-lázeňský zlom (Bankwitz et al., 2003).

Najvrchnejšia časť profilu do hĺbky 7,2 m je tvorená kvartérnym, málo vytriedeným pieskom, štrkom a rašelinou, pochádzajúce z nivy rieky Plesná, ktorá sa nachádza neďaleko vrtu. Od 7,2 m do hĺbky 15,5 m sa nachádza íl spolu so štrkom, patriace do Vildštejnského súvrstvia pliocénskeho veku. Ďalej od 15,5 m do 79 m hĺbky sa nachádzajú prevažne ílovce s polohami karbonátov, dolomitu a sádrovca patriace do Cyprisového súvrstvia miocénskeho veku. Práve v tejto vrstve je uložený snímač v hĺbke 70 m. V hĺbke od 79 m do 89,8 m sa nachádzajú usadené piesčité ílovce, v ktorých sa našli polohy hnedého uhlia a koreňové zvyšky. Spadajú do Hlavného Slojového súvrstvia do obdobia spodného miocénu. V najspodnejšej časti vrtu do hĺbky 108,5 m sa



Obrázok 7: Profil vrtu HJB-1 v západných Čechách (Bussert et al., 2017).



nachádzajú zvetrané svory pochádzajúce z paleozoika. Tieto svory v sebe obsahujú minerály kaolinitu, muskovitu, sideritu a kremeňa (Bussert et al., 2017). Celý profil vrtu je ilustrovaný na Obrázku 7.

## **5 Dáta**

### **Litoměřice**

Dáta využité pre túto prácu pochádzajú z dvoch oblastí. Prvou je lokalita Litoměřice, kde sa nachádza plytký a hlboký (geotermálny) vrt (Obrázok 10). V ňom sa v období od decembra 2019 do februára 2020 nachádzala vrtná seizmická stanica GLT1 v hĺbke 1500 m. Po krátkom čase bol snímač z vrtu vytiahnutý a stanica GLT1 bola niekoľko mesiacov nefunkčná. Snímač sa podarilo vrátiť do vrtu v marci 2021 (Obrázok 8). Druhá stanica GLT2 pribudla v nedávno vybudovanom vrte a snímač bol spustený do hĺbky 190 m. Na povrchu sa nachádza seizmická stanica GTCLT a práve záznamy z tejto stanice som porovnávala so záznamami z jednotlivých hĺbok vo vrte. Zaznamenané boli zemetrasenia vyvolané ťažbou medi vo veľkolome Lubin v Poľsku (Obrázok 8) a lokálne odpaly. Celkovo som pracovala s 18 javmi, z toho bolo 16 zemetrasení z Lubinu a len 2 lokálne odpaly. To je napríklad zapríčinené technickými problémami na povrchovej stanici GTCLT, kedy bol počas niekoľkých týždňov jeden z káblov porušený a dáta z tohto obdobia boli nepoužiteľné, alebo nedostatočnou kvalitou záznamu na ďalšie spracovanie. Zoznam javov, ich druh a stanice na ktorých boli zaznamenané sú uvedené v Tabuľke 1.

Zaznamenávané boli tri zložky: Z, N, E. Stanica na povrchu GTCLT obsahuje kanály HHZ, HHN a HHE, hlboká stanica GLT1 kanály EHZ, EHN, EHE a plytká stanica GLT2 kanály CHZ, CHN, CHE. Na plytkej stanici sa zaznamenáva nie len velocimetrom ako na predošlých, ale aj akcelerometrom. Avšak pre účely tejto práce som dáta z akcelerometru nevyužila.

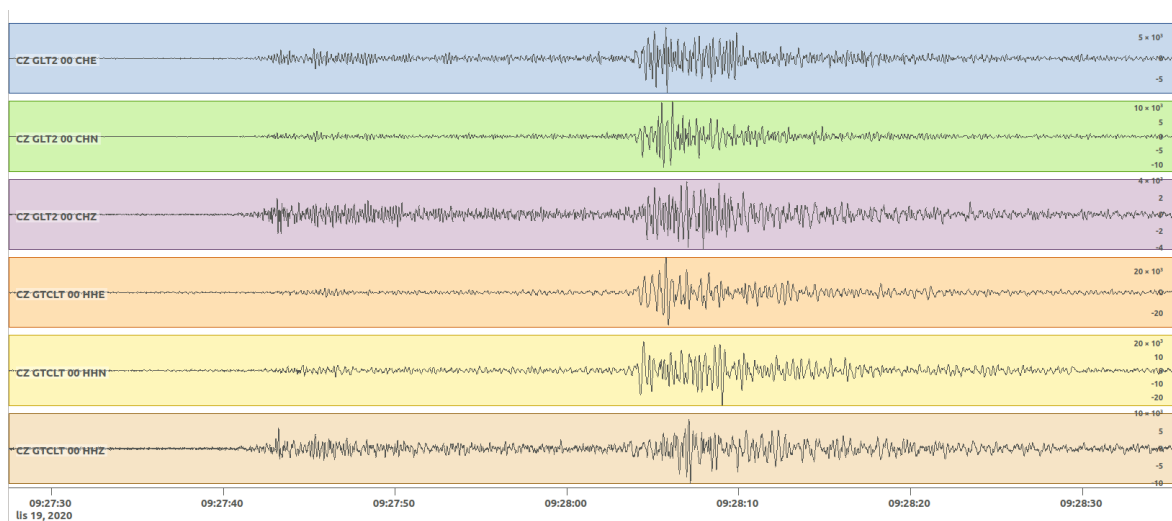
Na povrchu je seizmometer LE-3Dlite MkIII od firmy Lennartz Electronic, vo vrtoch sa nachádzajú snímače od firmy ASIR, v hĺbke 190 m je Fullband Sensitivity Accelerometer + 4,5 Hz seizmometer, v hĺbke 1500 m je rovnako snímač od firmy ASIR. Ich konkrétne parametre sú uvedené v Tabuľke 3.

*Tabuľka 1: Zoznam použitých javov (Litoměřice).*

| <b>Dátum</b> | <b>GTCLT<br/>povrch</b> | <b>GLT2<br/>190 m</b> | <b>GLT1<br/>1500 m</b> | <b>Typ javu</b> |
|--------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------|
| 05.10.2020   | x                       | x                     |                        | Odpal           |
| 19.11.2020   | x                       | x                     |                        | Lubin           |
| 03.12.2020   | x                       | x                     |                        | Odpal           |
| 11.02.2021   | x                       | x                     |                        | Lubin           |
| 20.02.2021   | x                       | x                     |                        | Lubin           |
| 22.02.2021   | x                       | x                     |                        | Lubin           |
| 23.02.2021   | x                       | x                     |                        | Lubin           |
| 27.02.2021   | x                       | x                     |                        | Lubin           |
| 11.04.2021   | x                       | x                     |                        | Lubin           |
| 11.04.2021   | x                       | x                     |                        | Lubin           |
| 11.04.2021   | x                       | x                     |                        | Lubin           |
| 04.03.2021   | x                       | x                     |                        | Lubin           |
| 17.03.2021   | x                       | x                     |                        | Lubin           |
| 05.05.2021   | x                       | x                     | x                      | Lubin           |
| 09.05.2021   | x                       | x                     | x                      | Lubin           |
| 08.06.2021   | x                       | x                     | x                      | Lubin           |
| 16.06.2021   | x                       | x                     | x                      | Lubin           |
| 18.06.2021   | x                       | x                     | x                      | Lubin           |



Obrázok 8: Inštalácia snímača ASIR do hlbokého vrtu v Litoměřicích v marci 2021.



Obrázok 9: Příklad zemetrasenia pochádzajúceho z Lubinu zaznamenaného na staniciach GTCLT a GLT2 v Litoměřicích 19.11.2020.



*Obrázok 10: Umiestnenie jednotlivých staníc v Litoměřicích.*

### **Západne Čechy**

Dáta zo Západných Čiech pochádzajú konkrétne z Hartoušova. Tu sa nachádza vrt, v ktorom je umiestnená vrtná stanica s názvom EHF2 v hĺbke 70 m a na povrchu sa nachádza stanica EHF1. Javy, s ktorými som pracovala, sú zemetrasenia pravidelne vznikajúce v danej oblasti. Sú automaticky detekované programom PEPIN. V období, v ktorom som mohla začať pracovať s týmito zemetraseniami, sa nevyskytoval žiadny seizmický roj, a aj preto je počet mnou použitých javov limitovaný. Veľkosti magnitúda sa pohybovali od hodnôt 0,5 až 1,6 a všetky ohniská sa nachádzali v blízkosti Nového Kostela. Ich priemerná hĺbka bola 7 km.

7.4. 2021 bol pred vstupom do loggeru umiestnený predzosilňovač od firmy ASIR, ktorý zaznamenaný signál zosilnil 32x. Kvôli problémom pri prvotnom spracovaní, spôsobeným práve týmto zosilnením, som používala dáta až z obdobia od 12.5.2021. Vtedy bol odstránený predzosilňovač a navrátený bol digitizér DataCube namiesto Güralpu Minmus+. Zaznamenávané boli tri zložky: Z, N, E. Stanica EHF1 obsahuje konkrétne kanály EHZ, EHN, EHE a stanica EHF2 kanály CNZ, CNN a CNE, ktoré predstavujú zrýchlenie, pretože sa vo vrte nachádza akcelerometer. Práve preto museli byť záznamy pri zobrazení a spracovaní zintegrované.

Seizmometer použitý na povrchu je Trillium Compact od firmy Nanometrics, vo vrte je snímač od firmy ASIR a ich ďalšie parametre sú uvedené v Tabuľke 3.

*Tabuľka 2: Zoznam použitých javov (Hartoušov).*

| Dátum      | EHF1<br>povrch | EHF2<br>70 m |
|------------|----------------|--------------|
| 14.05.2021 | x              | x            |
| 27.05.2021 | x              | x            |
| 03.06.2021 | x              | x            |
| 06.05.2021 | x              | x            |
| 06.05.2021 | x              | x            |
| 06.07.2021 | x              | x            |

*Tabuľka 3: Zoznam všetkých seizmických staníc a ich parametre.*

| Stanica | Hĺbka<br>snímača<br>[m] | Typ snímača                     | Frekvenčný<br>rozsah<br>[Hz] | Digitizér             | Vzorkovacia<br>frekvencia<br>[Hz] | Citlivosť<br>[V/ms-1] | Zosilnenie<br>[count/nm <sup>-1</sup> ]<br>[count/nms <sup>-2</sup> ] |
|---------|-------------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|---|
| GTCLT   | 0                       | Le3Dlite MkIII<br>(velocimeter) | 1-100                        | Güralp<br>Minimus+    | 250                               | 400                   | 328   |
| GLT2    | 190                     | Asir<br>(velocimeter)           | >5                           | Güralp<br>Minimus+    | 250                               | 79                    | 2070  |
| GLT1    | 1500                    | Asir<br>(velocimeter)           | >5                           | GAIA                  | 250                               | 79                    | 1992  |
| EHF1    | 0                       | Trillium<br>(velocimeter)       | 1-108                        | DataCube<br>(s/n B6P) | 100                               | 750                   | 3074  |
| EHF2    | 70                      | Asir<br>(akcelerometer)         | 0,005-400                    | DataCube<br>(s/n A7U) | 200                               | 60                    | 246   |

## 6 Postup práce

Cieľ tejto práce môžeme zhrnúť do týchto bodov:

- a) Zistenie závislosti amplitúd na hĺbke snímača a následné porovnanie s teoretickým odhadom – 2 spôsoby postupu:
  - zistenie strednej hodnoty (RMS) amplitúd
  - frekvenčná závislosť pomeru amplitúd pomocou spektrálnej analýzy
- b) určenie útlmu pripovrchovej vrstvy

Na spracovanie dát som používala program vytvorený mojím školiteľom s názvom SeisLook v prostredí MATLAB, vyvíjanom spoločnosťou MathWorks. Program je schopný načítať dáta z jednotlivých staníc, prevzorkovať ich na požadovanú vzorkovaciu frekvenciu, alebo v prípade potreby záznam automaticky zintegrovat'.

### Príprava dát

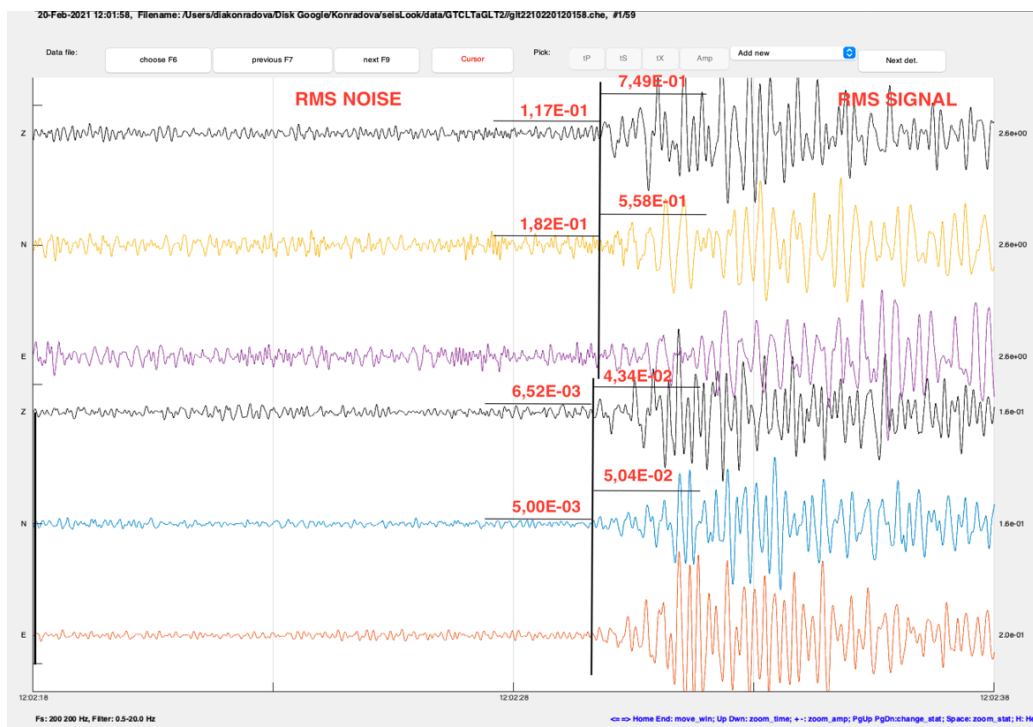
Prvým krokom pri práci so seizmickými záznamami bolo z dát pochádzajúcich zo seizmických staníc v Litoměřicih vybrať silnejšie javy s magnitúdom väčším ako 1 a ideálne až 1,5. Tým som sa snažila dosiahnuť toho, že pri následnom určovaní pomeru signálu a šumu - SNR budú výsledné hodnoty dostatočne vysoké. V opačnom prípade, ak bolo  $M < 1$ , tak amplitúda signálu na zázname nebola dostatočne veľká a v častých prípadoch nebolo možné presne určiť prvé nasadenie P-vlny. K tomuto výberu som používala program Snuffler (Heimann et al., 2017). Po nájdení vhodných javov som z celodenných záznamov vyrezala len potrebný úsek signálu a šumu. K tomu mi slúžil skript, ktorý mi taktiež sprostredkoval školiteľ, a následne som si ho upravila podľa mojich ďalších potrieb. Problém nastal pri príprave dát z hlbkej stanice GLT1, pretože záznamy sa automaticky ukladali ako hodinové súbory a nie ako celodenné, ale aj to som vyriešila správnou úpravou skriptu. Všetky súbory, s ktorými som pracovala, boli vo formáte mseed. Vyrezané javy mali celkovú dĺžku 1,5 min, 30 sekúnd záznamu šumu a 1 minúta záznamu signálu od príchodu P-vlny. Rovnaký postup som použila aj na dáta z Hartoušova, s tým rozdielom, že magnitúdo vybraných zemetrasení muselo byť väčšie ako 0,5.

## Zistenie zosilnenia amplitúd a SNR

V programe SeisLook som určila prvé nasadenie P-vlny a v okne s dĺžkou 2 s sa vypočítali kvadratické priemery - RMS amplitúd šumu a signálu. Automaticky sa vypočítal aj ich pomer – SNR (Signal to Noise Ratio) podľa nasledujúceho vzorca:

$$SNR = \frac{A_{RMS(signál)}}{A_{RMS(šum)}} \quad (32)$$

Príklad určených RMS je ukázaný na Obrázku 11. Tento postup som aplikovala na všetky hĺbkové úrovne v Litoměřicih a v Hartoušově. Získané hodnoty RMS amplitúd a SNR som zapisovala do tabuliek v programe Excel, kde som vytvorila grafy zobrazujúce zosilnenie signálu a šumu vo vrtoch. K tomuto som využila všetky dostupné dáta v podobe zemetrasení z Lubinu a lokálne odpaly. Veľkosti amplitúd signálu vo vrte som vykreslila v závislosti na amplitúdach na povrchu. Ďalej som vypočítala pomery amplitúd povrch/vrt a určila priemernú amplitúdu zo všetkých javov (Tab. 4 a 5). Táto hodnota určovala smernicu priamky, ktorá prechádza počiatkom grafu a ilustruje zosilnenie amplitúd na povrchu. Tento postup som aplikovala aj na amplitúdy šumu a všetky hĺbkové úrovne (Obrázok 12 a 13). Do grafov som vykreslila aj jednotlivé pomery SNR, na ktorých je ilustrovaný ich rozdiel medzi vrtom a povrchom (Obrázky 14 až 17).



Obrázok 11: Záznam zo stanice GLT2 s určenými hodnotami RMS amplitúd šumu a signálu.

## Spektrálna analýza

V programe Matlab som k ďalšiemu spracovaniu a postupu vytvorila skript, ktorý je určený na zobrazenie jednotlivých spektier signálu, šumu a ich pomerov. Skript načíta postupne všetky súbory vo formáte .mat zo všetkých staníc, ktoré boli vytvorené pomocou programu SeisLook. Majú dĺžku presne 800 vzoriek a na hodnote 400 sa nachádza prvé nasadenie P-vlny. Skript si ich automaticky rozdelí na časť záznamu so šumom a na tú so signálom. Následne sa pomocou funkcie *pmtm* (Multitaper power spectral density estimate) vypočítajú priemerné hodnoty spektier. Rozhodla som sa použiť práve túto funkciu z toho dôvodu, že bez použitia taperov mi výsledky oscilovali. Mnou volenou hodnotou bola šírka časového pásma. Zvolila som hodnotu 2, pretože tým som dosiahla ideálne vyhladenie spektra.

Spektrá som rozdelila na komponentu vertikálnu - Z a horizontálnu - H, ktorá je určená ako geometrický priemer vypočítaných spektier zložiek N a E. Ďalej som počítala vzájomné pomery medzi signálom seizmogramu na povrchu a vo vrte, opakovane pre všetky hĺbky a potom pre šum. Takto vypočítané spektrá a ich pomery som vykreslila do grafov, kde je znázornená závislosť na frekvencii. Jej maximálnu hodnotu vykresľovania som určila na 90 Hz, aby som zachovala Nyquistov teorém. Takto som zobrazila aj pomer signál/šum a pre lepšiu predstavu som vykreslila aj časť záznamu, na ktorom je zobrazený šum pred príchodom P-vlny a následný signál.

## Určenie útlmu

Prvým krokom pri postupe určovania útlmu bolo zistenie smernice regresnej priamky z dát pomeru signálov na povrchu a vo vrte, ktoré som získala zo spektrálnej analýzy. K určeniu útlmu je podstatné, aby takáto priamka preložená dátami mala zápornú smernicu, a teda klesala. Je potrebné zvoliť správny frekvenčný rozsah, ktorým sa priamka preloží, pretože pomer signálov klesá len do určitej frekvencie. K výpočtu je potrebné ešte určiť, z prvého nasadenia P-vlny, čas prechodu seizmického paprsku  $t_{2-1}$  zo snímača vo vrte k snímaču na povrchu.

Vychádzala som zo vzorca 23, ktorý predstavuje rovnicu priamky:



$$y = a - bx$$

$$\ln(R(f)) = \ln(A) - \pi(t_1^* - t_2^*)f \quad (23)$$

Pomer signálov som preto zlogaritmovala a vyniesla v lineárnej mierke v závislosti na frekvencii. V zvolenom frekvenčnom rozsahu som dáta preložila polynómom prvého stupňa pomocou funkcie *polyfit*. Z výslednej rovnice priamky som získala hodnotu absolútneho člena  $\ln(A) = a$  a hodnotu  $-\pi t^* = -b$ . Ďalším krokom bolo vyjadriť operátor útlmu, ktorý sa vypočíta následným vydelením:

$$t^* = \frac{-b}{-\pi} \quad (33)$$

Po jeho dosadení do rovnice 34 som získala výsledný faktor kvality  $Q$ .

$$\frac{t_{2-1}}{t^*} = Q \quad (34)$$

## 7 Výsledky

### 7.1 Zosilnenie amplitúd a SNR

Prvým výsledkom mojej práce je určenie amplitúd javov vo všetkých hĺbkových úrovniach. Tie sú zobrazené v Tabuľke 10 v kapitole Prílohy. Z týchto údajov sa potvrdilo tvrdenie vyplývajúce z rovnice 7, že prechodom paprsku prostredím s menšou hustotou sa amplitúda zvýši. V Litoměřicích sú amplitúdy signálu na povrchu veľké rádovo od  $10^{-1}$  až  $10^0$   $\mu\text{m/s}$ . V hĺbkach 190 m a 1500 m sú tieto hodnoty v porovnaní s povrchom o rád nižšie, teda  $10^{-2}$  až  $10^{-1}$   $\mu\text{m/s}$ . Tento rozptyl je ovplyvnený rôzne silnými javmi s ktorými som pracovala. V Hartoušově majú amplitúdy veľkosti rádovo  $10^{-2}$   $\mu\text{m/s}$  na povrchu a vo vrte  $10^{-3}$   $\mu\text{m/s}$ . Obdobne to platí aj pre šum.

V Tabuľke 4 sú ukázané pomery amplitúd, ktoré predstavujú zosilnenie amplitúd na povrchu na stanicách v Litoměřicích. Z nich som určila priemerné zosilnenie na oboch zložkách a výsledkom je, že signál je zosilnený viac na vertikálnej zložke než na horizontálnej, avšak v prípade šumu je tomu naopak. Signál je na povrchu zosilnený 12x na vertikálnej a 10,5x na horizontálnej zložke v porovnaní s plytšou stanicou. V porovnaní s hlbšou stanicou je signál zosilnený na vertikále 14,5x a 7,5x na horizontále. Čo sa týka šumu, tak ten je na povrchu zosilnený 17x na vertikálnej a 31x na horizontálnej zložke

v porovnaní s plytkou stanicou a 28x na vertikálnej a 39x na horizontálnej zložke v porovnaní s hlbokou stanicou.

Tab. 5 predstavuje to isté ako Tab. 4 s tým rozdielom, že je zosilnenie amplitúd signálu a šumu na povrchu určené pre stanice v Hartoušově. Výsledky vyšli veľmi podobné ako v Litoměřicích. Šum je násobne viac zosilnený na povrchu než signál, a to 28x na vertikálnej a 31x na horizontálnej zložke. Signál je na povrchu zosilnený 13x na vertikálnej a 17,5x na horizontálnej zložke. Za pozornosť stojí spomenúť to, že snímač tu je len 70 m hlboko a signál je na povrchu zosilnený viac oproti snímaču, ktorý je v hĺbke 190 m v Litoměřicích. Toto má súvis s lokálnou geológiou.

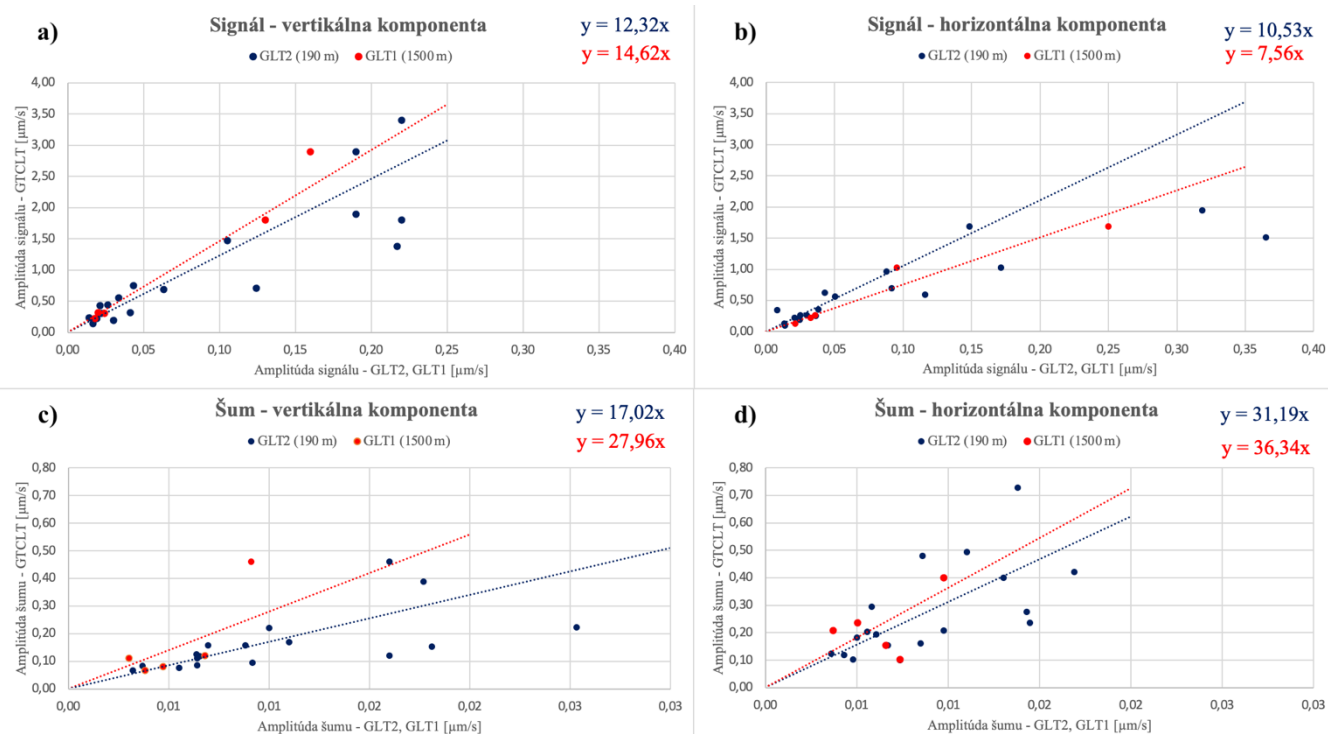
Tabuľka 4: Pomer amplitúd signálu a amplitúd šumu – zosilnenie seizmických amplitúd na povrchu (Litoměřice).

| Číslo<br>javu | Signál – vertikálna<br>komponenta |                | Signál –<br>horizontálna<br>komponenta |                | Šum – vertikálna<br>komponenta |                | Šum –<br>horizontálna<br>komponenta |                |
|---------------|-----------------------------------|----------------|--|----------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|
|               | GTCLT/<br>GLT2                    | GTCLT/<br>GLT1 | GTCLT/<br>GLT2                         | GTCLT/<br>GLT1 | GTCLT/<br>GLT2                 | GTCLT/<br>GLT1 | GTCLT/<br>GLT2                      | GTCLT/<br>GLT1 |
| 1             | 6,36                              |                | 4,14                                   |                | 8,81                           |                | 24,97                               |                |
| 2             | 15,45                             |                | 6,10                                   |                | 22,00                          |                | 55,79                               |                |
| 3             | 14,00                             |                | 10,96                                  |                | 21,92                          |                | 52,83                               |                |
| 4             | 16,74                             |                | 41,72                                  |                | 17,82                          |                | 50,77                               |                |
| 5             | 17,26                             |                | 11,07                                  |                | 17,94                          |                | 36,40                               |                |
| 6             | 16,64                             |                | 9,21                                   |                | 19,47                          |                | 32,01                               |                |
| 7             | 19,91                             |                | 10,56                                  |                | 22,56                          |                | 34,26                               |                |
| 8             | 16,65                             |                | 6,85                                   |                | 22,62                          |                | 36,76                               |                |
| 9             | 5,69                              |                | 5,13                                   |                | 8,51                           |                | 19,30                               |                |
| 10            | 6,48                              |                | 7,76                                   |                | 10,33                          |                | 19,13                               |                |
| 11            | 8,74                              |                | 7,11                                   |                | 13,47                          |                | 13,70                               |                |
| 12            | 10,95                             |                | 14,67                                  |                | 15,45                          |                | 44,89                               |                |
| 13            | 10,00                             |                | 7,56                                   |                | 13,82                          |                | 27,91                               |                |
| 14            | 8,18                              | 13,85          | 5,99                                   | 10,77          | 7,50                           | 17,65          | 16,37                               | 46,98          |
| 15            | 7,80                              | 16,00          | 8,91                                   | 7,37           | 17,19                          | 36,67          | 21,35                               | 56,51          |
| 16            | 11,58                             | 12,22          | 9,97                                   | 6,18           | 21,25                          | 17,89          | 21,41                               | 13,95          |
| 17            | 15,26                             | 18,13          | 11,38                                  | 6,76           | 28,75                          | 50,55          | 30,68                               | 41,04          |
| 18            | 14,09                             | 12,92          | 10,54                                  | 6,73           | 17,02                          | 17,02          | 22,89                               | 23,22          |
|               | <b>Priemer</b>                    |                |  |                |                                |                |                                     |                |
|               | 12,32                             | 14,62          | 10,53                                  | 7,56           | 17,02                          | 27,96          | 31,19                               | 36,34          |
|               | <b>Smerodajná odchýlka</b>        |                |  |                |                                |                |                                     |                |
|               | 4,44                              | 2,42           | 8,22                                   | 1,84           | 5,65                           | 15,11          | 12,92                               | 17,43          |

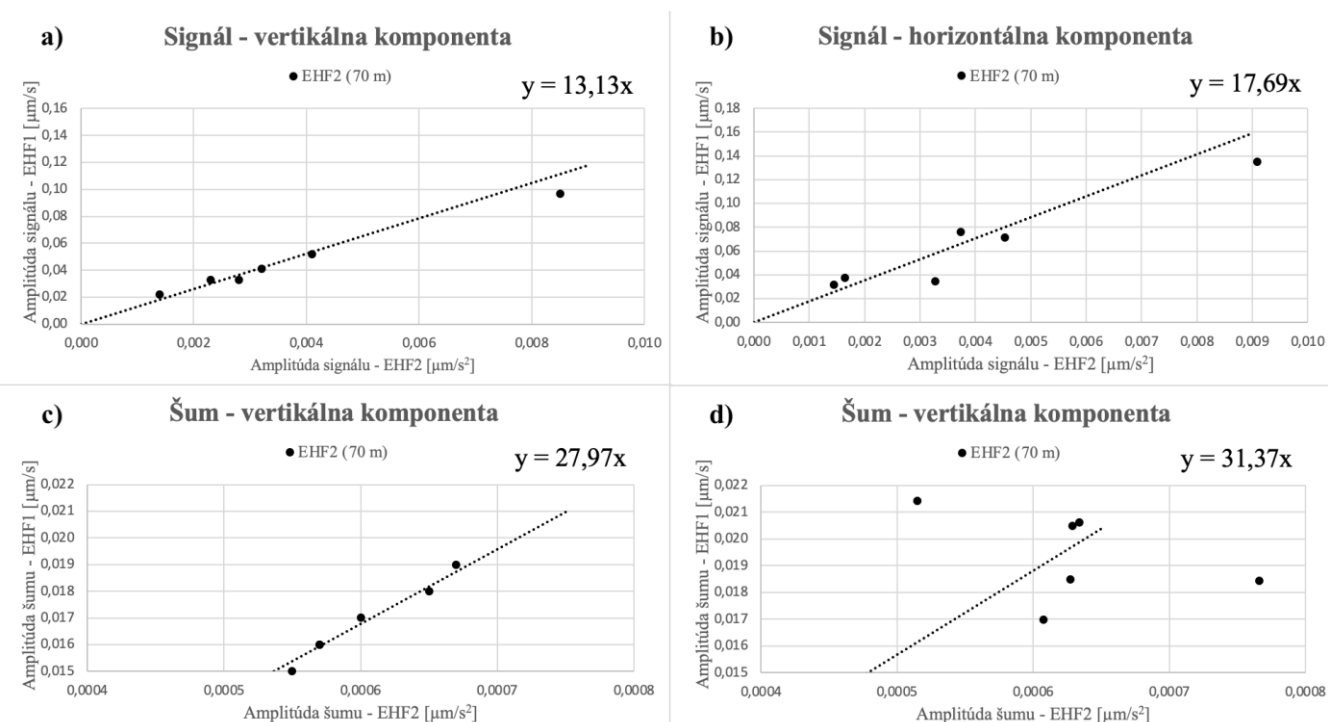
Tabuľka 5 Pomer amplitúd signálu a amplitúd šumu – zosilnenie seizmických amplitúd na povrchu (Hartoušov).

| Číslo<br>javu | Signál –<br>vertikálna<br>komponenta | Signál –<br>horizontálna<br>komponenta | Šum –<br>vertikálna<br>komponenta | Šum –<br>horizontálna<br>komponenta |
|---------------|--------------------------------------|--|-----------------------------------|-------------------------------------|
|               | EHF1/EHF2                            |  | EHF1/EHF2                         |                                     |
| 1             | 12,81                                | 20,35                                  | 28,36                             | 32,54                               |
| 2             | 15,71                                | 22,84                                  | 28,33                             | 41,60                               |
| 3             | 14,35                                | 21,71                                  | 27,69                             | 24,08                               |
| 4             | 12,68                                | 15,79                                  | 28,07                             | 32,60                               |
| 5             | 11,41                                | 14,84                                  | 28,07                             | 29,49                               |
| 6             | 11,79                                | 10,58                                  | 27,27                             | 27,93                               |
|               | <b>Priemer</b>                       |  |                                   |                                     |
|               | 13,13                                | 17,69                                  | 27,97                             | 31,37                               |
|               | <b>Smerodajná odchýlka</b>           |  |                                   |                                     |
|               | 1,63                                 | 4,74                                   | 0,42                              | 5,94                                |

Výsledky z Tab. 4 sú ilustrované na Obrázku 12. Smernice jednotlivých priamok, ktoré v Tab. 4 predstavujú hodnotu priemeru na jednotlivých zložkách a ktoré prechádzajú bodom 0, sú výsledné zosilnenia signálu a šumu na povrchu v Litoměřicích. Pre Hartoušov sú výsledky zosilnenia z Tab. 5 ilustrované na Obrázku 13 a aj v tomto prípade je priemer všetkých amplitúd z Tab. 5 rovný smernici priamky.



Obrázok 12: Ilustrácia zosilnenia amplitúdy signálu (a,b) a šumu (c,d) na povrchu pre obe zložky spolu s vyjadrenou rovnicou priamky, ktorej smernica určuje zosilnenie. Čierna farba reprezentuje amplitúdy na plytkej stanici GLT2 a červená farba amplitúdy na hlbkej stanici GLT1 v Litoměřicih.

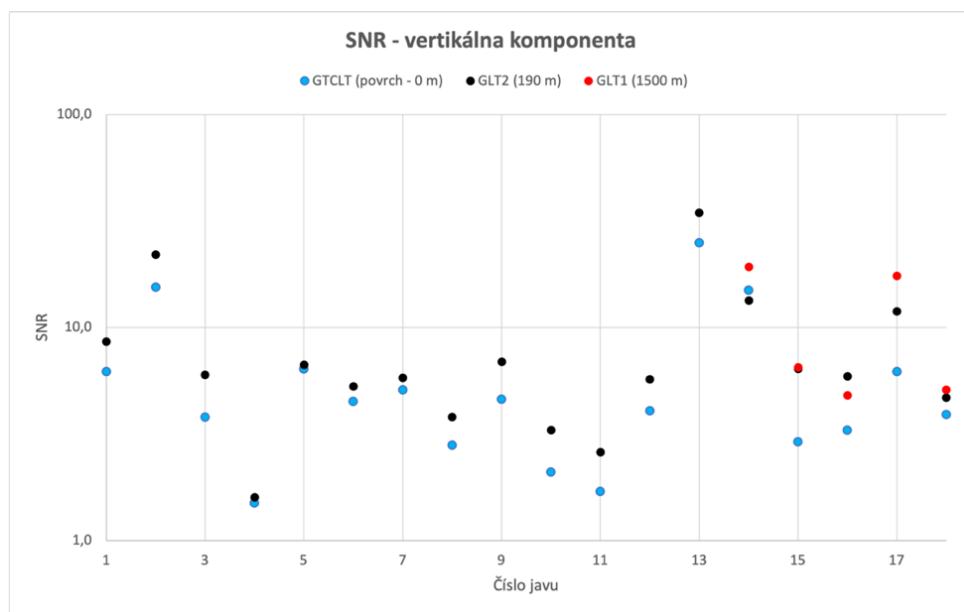


Obrázok 13: Ilustrácia zosilnenia amplitúdy signálu (a,b) a šumu (c,d) na povrchu pre obe zložky v Hartoušově spolu s vyjadrenou rovnicou priamky, ktorej smernica určuje zosilnenie.

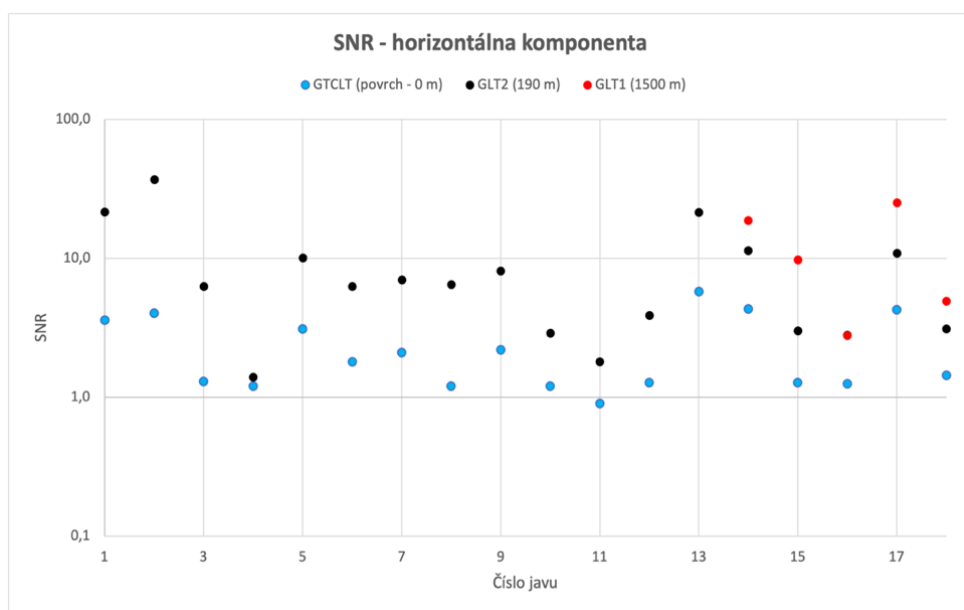
Na Obrázkoch 14 a 15 sú znázornené hodnoty pomeru signálu/šum (SNR) určený z údajov v Tab. 10 (príloha) pre jednotlivé javy a stanice. Je dobre viditeľné, že tento pomer je vždy lepší vo vrte než na povrchu. V prípade vertikálnej zložky sa objavilo niekoľko výnimiek, a to v prípade javov číslo 14 a 16 v Litoměřicích. V prvom prípade je SNR lepšie na povrchu než v hĺbke 190 m. Na povrchovej stanici GTCLT dosahuje SNR hodnotu 15 a na vrtnej stanici GLT2 hodnotu 13,4. Ďalej do hĺbky 1500 m sa šum dostatočne eliminoval a SNR má hodnotu 19,3, čo je najvyššia zaznamenaná hodnota. Nedá sa presne určiť, čo je príčinou vyššieho šumu vo vrte než na povrchu, ale predpokladám, že je to spôsobené nestacionaritou šumu. Keďže pri spracovaní záznamu v programe SeisLook používam okno dlhé len dve sekundy a neberiem do úvahy denný priemer šumu, tak mohla nastať situácia, kedy bol šum vyšší v priebehu dvoch sekúnd pred príchodom P-vlny, než je jeho denný priemer. V druhom prípade je SNR lepšie na stanici GLT2 (5,9) než na stanici GLT1 (4,8) a aj tu opäť predpokladám rovnaký vplyv nestacionarity šumu ako v prvom prípade.

Ak porovnáam hodnoty na vertikálnej komponente s tými na horizontálnej, tak na horizontálnej všetky hodnoty pre všetky stanice zodpovedajú teórii, že šum s hĺbkou klesá a tým pádom sme zaznamenali lepší signál. Neobjavili sa na nej žiadne výnimky ako na vertikálnej komponente.

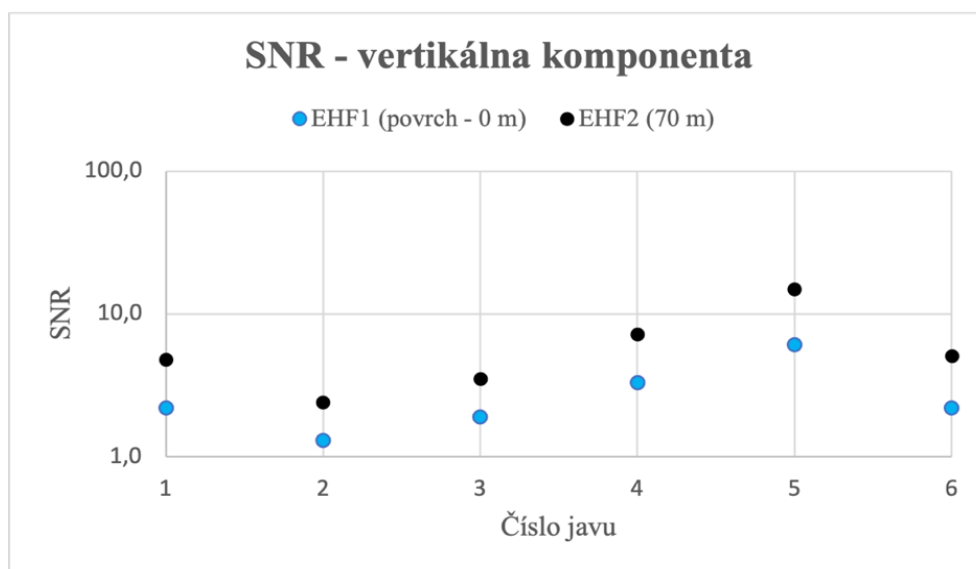
V prípade Hartoušova, ako je vidieť na Obrázkoch 16 a 17, je SNR vždy lepšie vo vrte než na povrchu. Dosahuje podobných hodnôt pre všetky javy a obe zložky. Aj v tomto prípade je SNR ovplyvnené veľkosťou javu. Napríklad jav číslo 5 dosahoval magnitúda 1,2 (Tab. 2) a tým dosiahlo SNR hodnoty 15 pre vrt a 6 pre povrch. Je to výrazne viac než u ostatných javov, ktorých magnitúdo bolo priemerne 0,6-0,8.



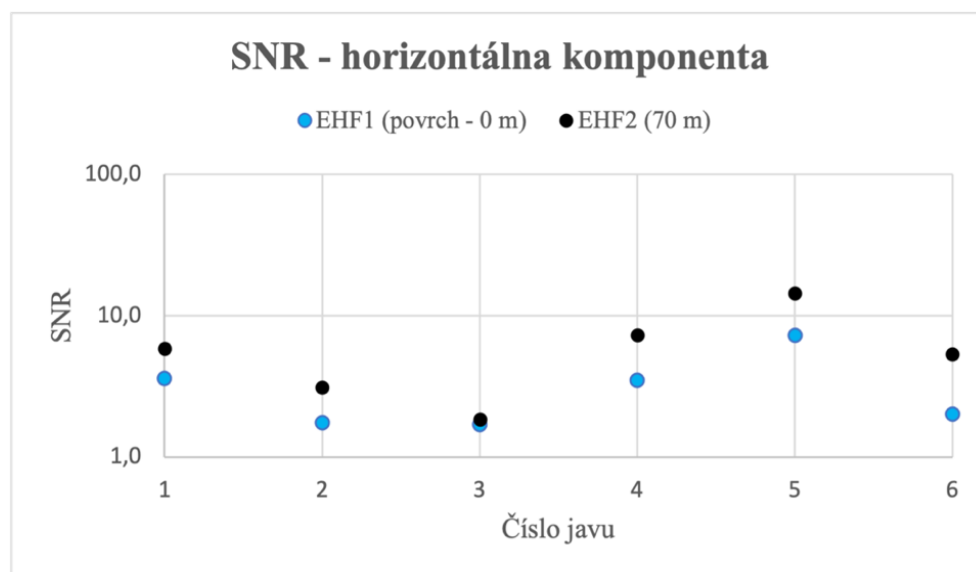
Obrázok 14: Zobrazenie pomerov signálu a šumu pre jednotlivé javy na vertikálnej zložke. Modrá farba – povrchová stanica GTCLT, čierna farba – vrtná stanica GLT2, červená farba – vrtná stanica GLT1



Obrázok 15: Zobrazenie pomerov signálu a šumu pre jednotlivé javy na horizontálnej zložke. Modrá farba – povrchová stanica GTCLT, čierna farba – vrtná stanica GLT2, červená farba – vrtná stanica GLT1.



Obrázok 16: Zobrazenie pomerov signálu a šumu pre jednotlivé javy na vertikálnej zložke. Modrá farba – povrchová stanica EHF1, čierna farba – vrtná stanica EHF2



Obrázok 17: Zobrazenie pomerov signálu a šumu pre jednotlivé javy na vertikálnej zložke. Modrá farba – povrchová stanica EHF1, čierna farba – vrtná stanica EHF2



S využitím akustických impedancií som sa snažila o overenie platnosti rovnice 7 aplikovanej na moje dáta. Impedancia je hodnota závislá na hustote prostredia  $\rho$  a rýchlosti šírenia seizmickej vlny  $v_P$  v nej. Z rovnice 7 teda vyplýva, že pomer amplitúd by mal byť rovný inverznej hodnote pomeru druhých mocnín impedancií. S odhadnutými hodnotami hustoty a rýchlostí som vypočítala impedancie, následne teoretické pomery amplitúd a skutočné pomery. Tie som zapísala do Tabuľky 6 a 7. Výsledky nie sú uspokojivé, keďže sa vypočítané a teoretické hodnoty od seba veľmi líšia. Skutočné pomery sú väčšie než tie očakávané a to približne 4,5x viac pre pomer medzi povrchovou a plytkou stanicou a 3,5x viac medzi povrchovou a hlbokou stanicou v Litoměřicih. V Hartoušově je rozdiel medzi povrchovou a vrtnou stanicou ešte väčší. Tam sa hodnoty líšia približne 6,5x. Pravdepodobný dôvodom, prečo sa skutočné a teoretické hodnoty tak líšia je ten, že neboli správne odhadnuté rýchlosti P-vln v daných geologických vrstvách, hustoty hornín a neboli zahrnuté ďalšie efekty ovplyvňujúce amplitúdu.

*Tabuľka 6: Teoretické a skutočné pomery amplitúd – Litoměřice. Hodnoty  $v_{P1}$  a  $\rho_1$  odpovedajú povrchovej vrstve,  $v_{P2}$  a  $\rho_2$  pripovrchovej vrstve.  $A_1$  je amplitúda na povrchu a  $A_2$  vo vrte.*

| <b>Snímač</b>   | <b>Typ geologického prostredia</b> | <b><math>V_p</math><br/>[km/s]</b> | <b>Hustota<br/>[g/cm<sup>3</sup>]</b> | <b>Teoretický pomer amplitúd</b><br>$\sqrt{\frac{v_{p2} * \rho_2}{v_{p1} * \rho_1}}$ | <b>Skutočný pomer amplitúd</b><br>$\frac{A_1}{A_2}$ |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| GTCLT ( $A_1$ ) | Hlina                              | 0,6                                | 1,6                                   |  |   |
| GLT2 ( $A_2$ )  | Sedimenty                          | 3                                  | 2,1                                   | 2,56   | 11,50   |
| GLT1 ( $A_2$ )  | Svor                               | 5,8                                | 2,7                                   | 4,04   | 14,47   |

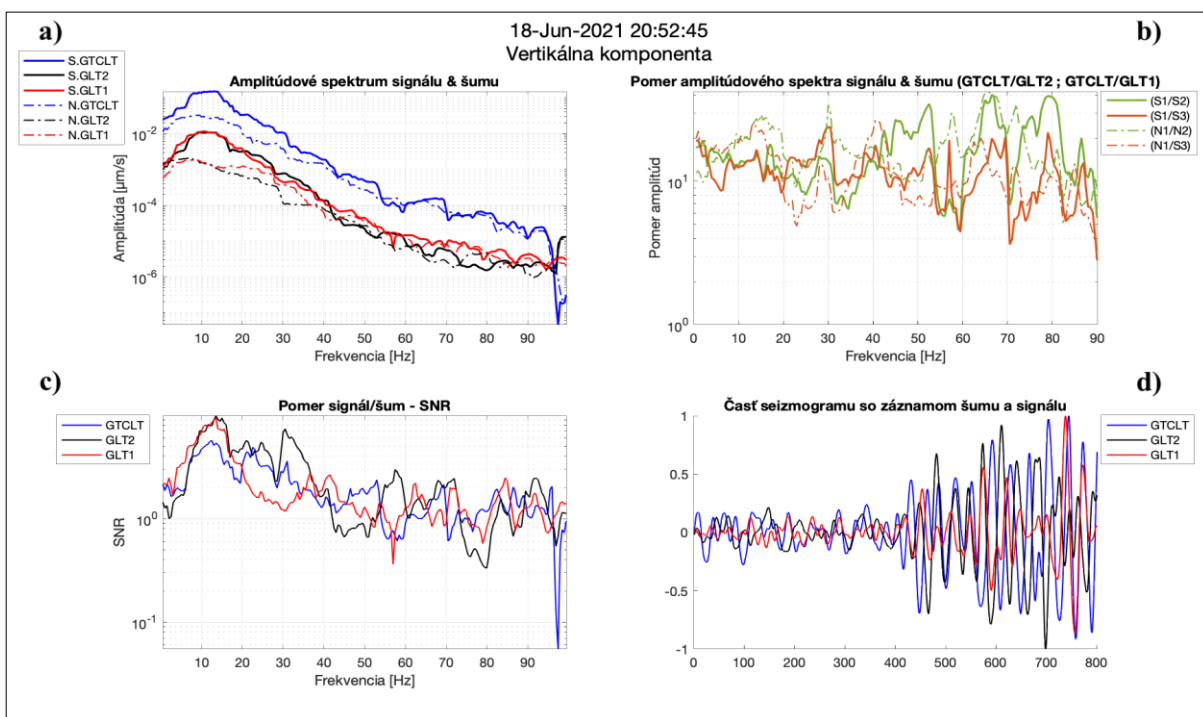
*Tabuľka 7: Teoretické a skutočné pomery amplitúd – Hartoušov.. Hodnoty  $v_{P1}$  a  $\rho_1$  odpovedajú povrchovej vrstve,  $v_{P2}$  a  $\rho_2$  pripovrchovej vrstve.  $A_1$  je amplitúda na povrchu a  $A_2$  vo vrte.*

| <b>Snímač</b>  | <b>Typ geologického prostredia</b> | <b><math>V_p</math><br/>[km/s]</b> | <b>Hustota<br/>[g/cm<sup>3</sup>]</b> | <b>Teoretický pomer amplitúd</b><br>$\sqrt{\frac{v_{p2} * \rho_2}{v_{p1} * \rho_1}}$ | <b>Skutočný pomer amplitúd</b><br>$\frac{A_1}{A_2}$ |
|----------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| EHF1 ( $A_1$ ) | Hlina                              | 0,6                                | 1,6                                   |  |   |
| EHF2 ( $A_2$ ) | Íl                                 | 1,6                                | 2,5                                   | 2,04   | 13,13   |

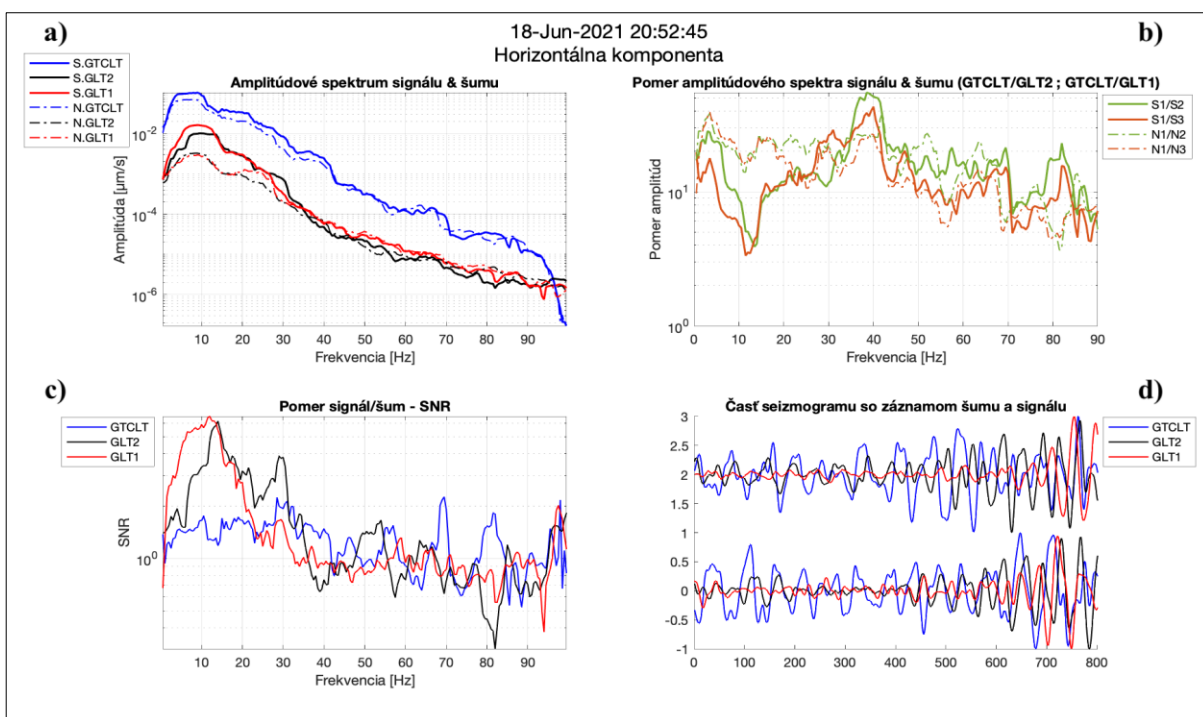
## 7.2 Spektrálna analýza

### Litoměřice

Na Obrázkoch 18 až 22 sú zobrazené výsledky zo spracovania amplitúd seizmických záznamov a ich spektier pomocou programu Matlab. Výsledky predstavujú štyri grafy pre vertikálnu komponentu a štyri grafy pre horizontálnu komponentu. Na prvých grafoch označených ako *a)* sa nachádzajú hodnoty amplitúdových spektier signálu a šumu pre všetky hĺbkové úrovně v závislosti na frekvencii. Tá dosahuje maximálnej hodnoty 90 Hz z dôvodu, aby nebol záznam ovplyvnený aliasingom. Z týchto výsledkov sa znovu potvrdilo, že veľkosť amplitúdy s hĺbkou klesá. Môžeme si všimnúť trendu, že rozdiel medzi veľkosťami amplitúd medzi vrtnými stanicami GLT2 a GLT1, ktoré medzi sebou delí 1310 hĺbkových metrov, nedosahuje tak veľkého rozdielu ako medzi povrchovou stanicou GTCLT a GLT2, ktoré delí len 190 hĺbkových metrov. Na ďalších grafoch značených *b)* je zobrazený výsledný pomer spektier signálu a spektier šumu v závislosti na frekvencii. V spektrálnej analýze budem používať označenie S pre signál a k tomu číslo 1,2 alebo 3. Toto číslo rastie s hĺbkou snímača a odliším tým jednotlivé stanice. Šum budem značiť obdobne písmenom N a číslom. Následne sú na grafoch *c)* určené pomery SNR, opäť rovnako v závislosti na frekvencii, a na posledných grafoch označených ako *d)* sú pre lepšiu predstavu o záznamoch s ktorými som pracovala ilustrované ich časti so šumom a následným signálom. Všetky boli normalizované na maximum amplitúdy.



Obrázok 18: Výsledky spektrálnej analýzy na vertikálnej zložke javu z 18.06.2021. Modrá farba – GTCLT (povrch), čierna farba – GLT2 (190 m), červená farba – GLT1 (1500 m). Plná čiara značí signál (S) a prerušovaná šum (N).



Obrázok 19: Výsledky spektrálnej analýzy na horizontálnej zložke javu z 18.06.2021. Modrá farba – GTCLT (povrch), čierna farba – GLT2 (190 m), červená farba – GLT1 (1500 m). Plná čiara značí signál (S) a prerušovaná šum (N).

Ako prvý príklad uvádzam jav z 18.6.2021. Jedná sa o zemetrasenie z poľského Lubinu s veľkosťou magnitúda 2,7. Na Obrázku 18a a 19a sú zobrazené amplitúdy signálu a šumu daného javu. Signál je ilustrovaný plnou čiarou a šum čiarou prerušovanou. Toto označenie bude použité vo všetkých výsledkoch. Maximálna amplitúda signálu na vertikálnej zložke sa nachádza okolo 10 Hz a dosahuje maxima 0,15  $\mu\text{m/s}$  na povrchovej stanici, 0,011  $\mu\text{m/s}$  na plytkej stanici a 0,01  $\mu\text{m/s}$  na hlbkej stanici. Na horizontálnej zložke je maximum signálu rovnako okolo 10 Hz a dosahuje hodnoty 0,1  $\mu\text{m/s}$  na povrchovej, 0,01 na plytkej a 0,016  $\mu\text{m/s}$  na hlbkej stanici. Následne so zvyšujúcou sa frekvenciou ich veľkosť postupne klesá. Je možné všimnúť si, že veľkosti amplitúd na staniách GLT2 a GLT1 sú na celom frekvenčnom rozsahu veľmi podobné. Dokonca nastáva to, že na horizontálnej zložke je amplitúda signálu na hlbkej stanici v okolí 10 Hz vyššia ako na plytkej. Šum dosahuje na tejto frekvencii tiež svoje maximum a to 0,03  $\mu\text{m/s}$  na povrchovej stanici, 0,002  $\mu\text{m/s}$  na plytkej stanici a 0,0018  $\mu\text{m/s}$  na hlbkej stanici pre vertikálnu zložku. Na horizontálnej zložke je šum o málo vyšší a dosahuje maximum 0,07  $\mu\text{m/s}$  na povrchovej, 0,003  $\mu\text{m/s}$  na plytkej a 0,0027  $\mu\text{m/s}$  na hlbkej stanici. Tieto výsledky sú zhodné s výsledkami z Tabuľky 10 v prílohe.

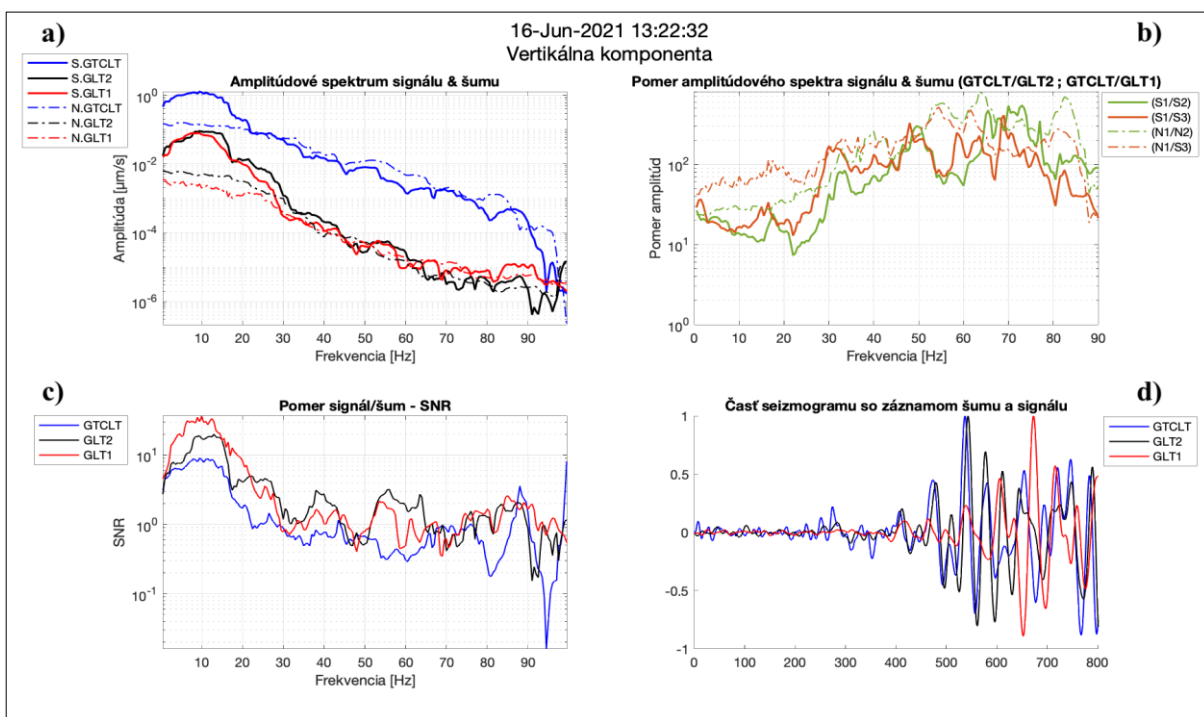
Ďalším výsledkom sú grafy na Obrázkoch 18b a 19b. Tie znázorňujú amplitúdové pomery signálov a pomery šumov medzi povrchom a vrtom. Tie predstavujú zosilnenie amplitúd na povrchu, avšak tentokrát je možné ho pozorovať v závislosti na frekvencii. Pomery signálov S1/S2 a S1/S3 sú na vertikálnej zložke približne konštantné, avšak len do 30 Hz. Do tejto frekvencie dosahujú hodnoty približne 14 a na vyšších frekvenciách už značne oscilujú. Maximálny pomer signálov S1/S2 na vertikálnej zložke je 39 a signálov S1/S3 je 22, zhodne na 80 Hz. To znamená, že pre tento jav je najväčšie zosilnenie signálu na povrchu práve na tejto vysokej frekvencii. Avšak na horizontálnej zložke môžeme vidieť veľký pokles pomeru signálu od frekvencie 3 Hz do 15 Hz. Tu S1/S2 klesne z 28 na 3,9 a pomer S1/S3 z 18 na 3,3. Následne začnú stúpať a rovnako ako na vertikále oscilovať. Svoje maximum, a teda najväčšie zosilnenie, dosahujú na frekvencii 40 Hz a to konkrétne 55 pre S1/S2 a 43 pre S1/S3. Výsledky pomerov šumu nie sú tak jednoznačné, pretože oscilujú na všetkých frekvenciách viac ako signál. Maximum N1/N2 je 41 na 65 Hz a maximum N1/N3 je 26 na 40 Hz pre vertikálnu zložku. Pre horizontálnu zložku sú maximá oboch pomerov 39, zhodne na frekvencii 4 Hz.

V prípade spektrálneho pomeru signál/šum, ilustrovanom na Obrázkoch 18c a 19c, dochádza k veľkým rozdielom medzi horizontálnou a vertikálnou zložkou, podobne ako na Obrázkoch 14 a 15. Na horizontálnej zložke je viditeľný veľký rozdiel medzi vrtnými stanicami a tou na povrchu, ale na vertikálnej už nie. Svoje maximum dosahujú SNR na frekvencii 10 Hz až 15 Hz a následne klesajú. Maximum na vertikálnej zložke je 9,9 pre hlbokú stanicu, 9,3 pre plytkú stanicu a 5,7 pre povrchovú stanicu. O niečo nižšie hodnoty vyšli na horizontálnej zložke, a to konkrétne 6,5 pre hlbokú, 6,1 pre plytkú a 1,8 pre povrchovú stanicu. Zmysel má len analýza do 30 Hz, pretože na vyšších frekvenciách dochádza k tomu, že SNR je približne 1 a tým pádom je amplitúda šumu rovnaká ako amplitúda signálu. Vzhľadom k prevažujúcemu útlmu vysokých frekvencií spôsobeného pripovrchovou vrstvou, ktorá tlmí vysoké frekvencie, ktoré tam my aj tak máme vyplýva, že vo vrte by sme mali zaznamenávať signál s vysokou frekvenciou a na povrchu s nižšou. Je to kvôli tomu, že vyššie frekvencie sa smerom k povrchu filtrujú. Táto skutočnosť je ovplyvnená prítomnosťou rezonancií. Sledujeme rozdiel medzi horizontálnou a vertikálnou zložkou, pre ktorú to zhruba platí, ale pre horizontálnu už nie.

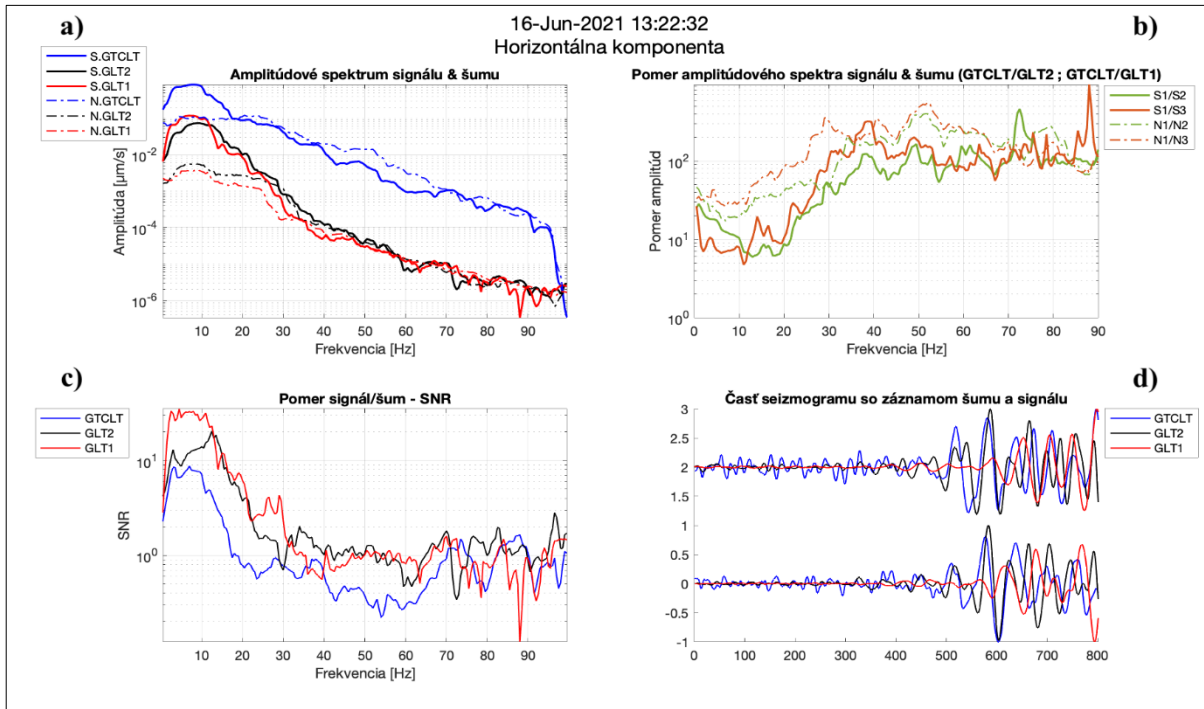
Druhým podobným, ale predsa rozdielnym príkladom je zemetrasenie z Lubinu 16.06.2021 s magnitúdom 3,7 (Obrázky 20 a 21). Rovnako aj tu dosahuje amplitúda signálu a šumu svojho maxima okolo frekvencie 10 Hz a postupne klesá (Obrázky 20a a 21a). Maximálna amplitúda signálu na vertikálnej zložke je 1,2  $\mu\text{m/s}$  na povrchovej stanici, 0,09  $\mu\text{m/s}$  na plytkej stanici a 0,07  $\mu\text{m/s}$  na hlbokkej stanici. V prípade horizontálnej zložky dosahuje amplitúda signálu maximum 0,8  $\mu\text{m/s}$  na povrchovej, 0,07  $\mu\text{m/s}$  na plytkej a 0,11  $\mu\text{m/s}$  na hlbokkej stanici. Už tu môžeme vidieť rozdiely v porovnaní s prvým prípadom, kedy maximálne amplitúdy signálu boli približne osemkrát nižšie ako v tomto prípade. Môže za to rozdielna veľkosť magnitúda týchto javov. Ďalším zaujímavým faktom je to, že do frekvencie 12 Hz je amplitúda signálu na horizontálnej zložke vyššia na stanici GLT1 než na GLT2. Toto potvrdzujú aj výsledky uvedené v Tab. 10 v prílohe. Amplitúda šumu dosahuje na vertikálnej zložke maxima 0,14  $\mu\text{m/s}$  na povrchovej stanici, 0,005  $\mu\text{m/s}$  na plytkej stanici a 0,003  $\mu\text{m/s}$  na hlbokkej stanici. Opäť rovnako od 30 Hz klesá, aj keď s menším sklonom než v prvom prípade. Maximum na horizontálnej zložke je 0,1  $\mu\text{m/s}$  na povrchovej, 0,005  $\mu\text{m/s}$  na plytkej a 0,003  $\mu\text{m/s}$  na hlbokkej stanici.

Spektrálne pomery amplitúd signálu  $S1/S2$  a  $S1/S3$  (Obrázky 20b a 21b) sú do 20 Hz podobné, s hodnotami približne 10. Následne so zvyšujúcou sa frekvenciou začnú stúpať a od 30 Hz sa opäť stanú pomerne konštantné, s menšími osciláciami než ako tomu bolo v prípade prvého javu. Maximum týchto pomerov sa nachádza na 70 Hz na oboch zložkách a dosahujú až hodnoty 410. Pomery amplitúd šumov  $N1/N2$  a  $N1/N3$  dosahujú vyššie hodnoty ako pomer signálov s maximom okolo 55 Hz pre obe zložky. V prípade  $N1/N2$  na vertikálnej zložke je tento pomer až 809 a pomer  $N1/N3$  len 480.

Na Obr. 20c a 21c je ilustrovaný pomer SNR. Je opäť lepší na horizontálnej zložke a hodnoty sú väčšie ako 1 len do 30 Hz. Maximum sa na každej stanici nachádza okolo 10 Hz. Na vertikálnej aj horizontálnej zložke to je 37 na hlbkej stanici, 19 na plytkej stanici a 9 na povrchovej stanici. Takto vysokého pomeru SNR na staniciach sa nedosiahlo pre žiadny iný jav a je to dané tým, že sa jedná o najsilnejší zaznamenaný jav z pomedzi všetkých 18 použitých na analýzu.



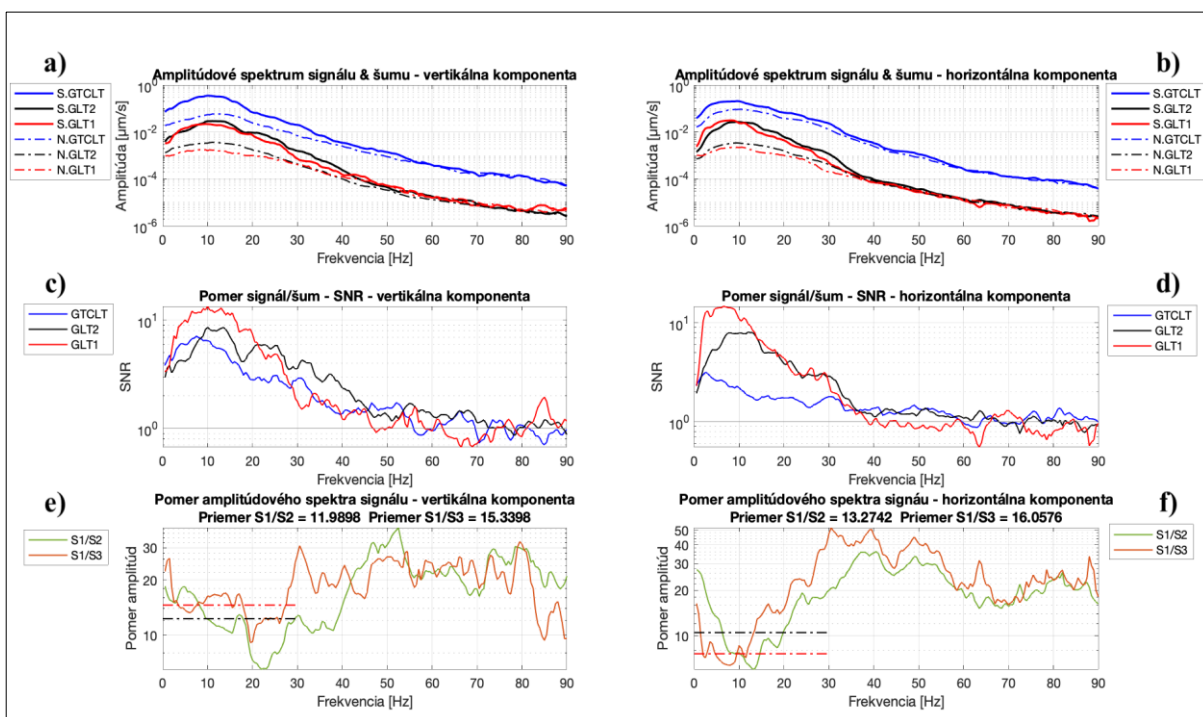
Obrázok 20: Výsledky spektrálnej analýzy na vertikálnej zložke javu z 16.06.2021. Modrá farba – GTCLT (povrch), čierna farba – GLT2 (190 m), červená farba – GLT1 (1500 m). Plná čiara značí signál (S) a prerušovaná šum (N).



Obrázok 21: Výsledky spektrálnej analýzy na horizontálnej zložke javu z 16.06.2021. Modrá farba – GTCLT (povrch), čierna farba – GLT2 (190 m), červená farba – GLT1 (1500 m). Plná čiara značí signál (S) a prerušovaná šum (N).

Obrázok 22 predstavuje rovnaké výsledky ako Obr. 18 až 21, s tým rozdielom, že vstupným údajom boli amplitúdy všetkých javov, nie len jedného konkrétneho. Obr. 22a a 22b ukazuje priemerné amplitúdové spektrum, v závislosti na frekvencii, všetkých javov pre vertikálnu a horizontálnu komponentu. Maximum priemernej amplitúdy signálu sa nachádza opäť okolo 10 Hz. Na vertikálnej zložke je 0,3  $\mu\text{m/s}$  na povrchovej stanici, 0,03  $\mu\text{m/s}$  na plytkej stanici a 0,02  $\mu\text{m/s}$  na hlbkej stanici. Na horizontálnej zložke sú maximálne amplitúdy signálu podobne veľké. Amplitúdy šumu dosahujú na vertikálnej zložke maxima 0,06  $\mu\text{m/s}$  na povrchovej stanici, 0,004  $\mu\text{m/s}$  na plytkej stanici a 0,002  $\mu\text{m/s}$  na hlbkej stanici. Pre horizontálnu zložku sú hodnoty o málo väčšie. K analýze som použila len javy, ktorých SNR bolo väčšie než 2 a splnila podmienku potrebnú k následnému určovaniu útlmu. Celkovo bolo použitých 12 javov zaznamenaných na stanicach GTCLT a GLT2 a 4 javy na všetkých troch stanicach. Z analýzy vyplýva, že najnižší šum je na stanici GLT1 v hĺbke 1500 m a najväčší na povrchu. Tieto výsledky sa nelíšia od výsledkov zo spektrálnej analýzy jednotlivých javov. Na Obr. 22c a 22d je určené SNR. To je lepšie na horizontálnej zložke, kde dosahuje maxima 11 na hlbkej stanici v rozsahu frekvencií od 2 až 12 Hz. Na plytkej stanici GLT2 je maximum 8 v rozsahu od 5 až 15 Hz. Na povrchu je SNR maximálne 3 a od 30 Hz sú hodnoty blízke 1 nie len pre povrch, ale aj vrtné stanice. Na vertikálnej zložke je rovnaký trend ako v prípade analýzy jednotlivých javov. Rozdiely SNR nie sú tak veľké, ale najlepší pomer je na hlbkej stanici a najhorší na povrchovej. Rozdielom je, že SNR sa rovná 1 až od 50 Hz. Na Obrázkoch 22e a 22f sú ilustrované spektrálne pomery stredných hodnôt spektier signálu. Práve tie tvoria základ k určeniu útlmu pripovrchovej vrstvy v tejto práci. Pomery šumov som v tomto prípade už neurčovala, pretože výsledky oscillovali a k ďalšiemu postupu neboli nutné. Pomery signálov S1/S2 aj S1/S3, predstavujúce zosilnenie, klesajú na vertikálnej zložke do frekvencie 20 Hz a následne stúpajú. To isté platí aj pre horizontálnu zložku s tým rozdielom, že klesajú len do frekvencie 10 Hz. V grafoch e) a f) je k tomu vypočítaný celkový priemer pomerov signálov len do 30 Hz, keďže analýza má zmysel len do danej frekvencie. Tieto priemery predstavujú zosilnenie amplitúd signálu na povrchu. Pre porovnanie s výsledkami z Tab. 4, prípade z Obr. 12a,b som do grafu ešte vykreslila hodnoty zosilnenia z Tab.4.



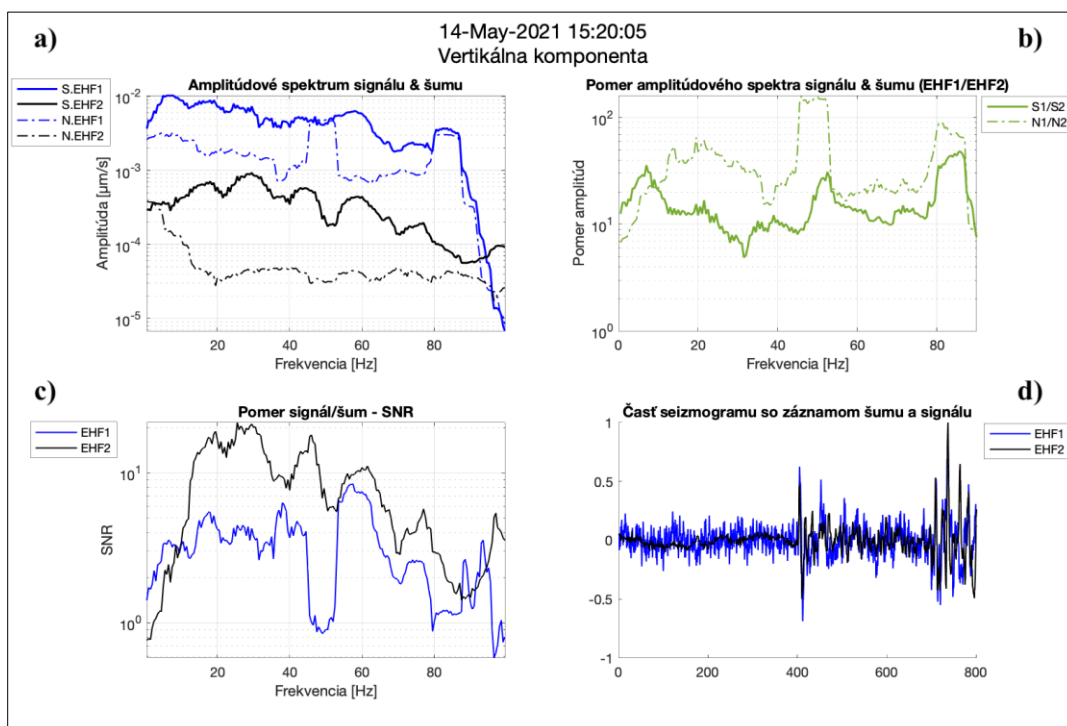


Obrázok 22: Spektrálna analýza všetkých javov s určením priemerných amplitúd. Modrá farba – GTCLT (povrch), čierna farba – GLT2 (190 m), červená farba – GLT1 (1500 m). Plná čiara značí signál (S) a prerušovaná šum (N).

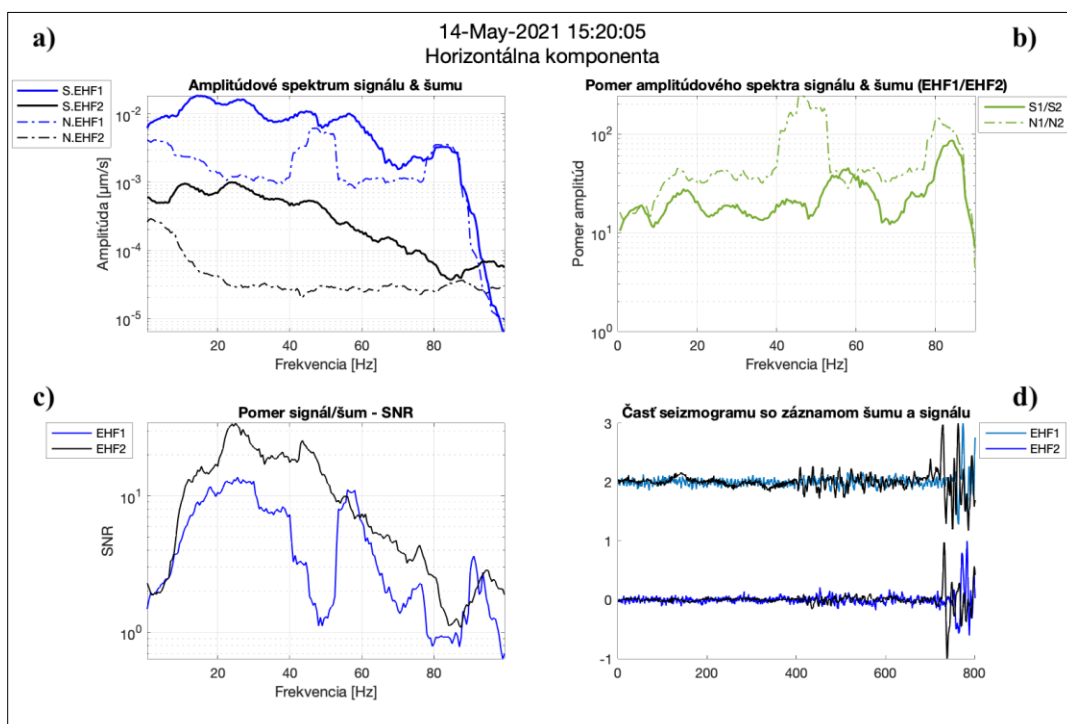
## Hartoušov

V nasledujúcich odsekoch sú tentokrát popísané výsledky zo spektrálnej analýzy pre oblasť Hartoušova. Výstup z programu Matlab je rovnaký ako v prípade Litoměřic. Pre každý jav sú dva obrázky, ktoré obsahujú štyri grafy vertikálnej a štyri grafy horizontálnej zložky. Ako prvý príklad uvádzam jav z 14.05.2021. Jedná sa o zemetrasenie s epicentrom v blízkosti Nového Kostela s magnitúdom 1,23. Na Obrázkoch 23a a 24a sú zobrazené amplitúdové spektrá signálu a šumu povrchovej stanice EHF1 a vrtnej stanice EHF2 na vertikálnej a horizontálnej zložke. Signál je opäť vykreslený plnou čiarou a šum prerušovanou. Amplitúda signálu a šumu je aj v tomto prípade na povrchu väčšia než vo vrte. Do 20 Hz dosahujú svojho maxima a následne so zvyšujúcou sa frekvenciou na oboch staniciach postupne klesajú veľmi pomaly. Maximálne veľkosti amplitúd signálu sú na vertikálnej a horizontálnej zložke takmer rovnaké a dosahujú hodnôt 0,01  $\mu\text{m/s}$  na povrchovej stanici a 0,001  $\mu\text{m/s}$  na vrtnej stanici. Hodnoty šumu dosahujú na vertikálnej a horizontálnej zložke maxima na malých frekvenciách do 10 Hz a následne klesnú na konštantné hodnoty 0,001  $\mu\text{m/s}$  na povrchu a rádovo  $10^{-5}$   $\mu\text{m/s}$  vo vrte. Je však potrebné

všimnúť si, že na povrchovej stanici je šum výrazne zvýšený na 50 Hz. To je spôsobené bežnou frekvenciou, ktorá sa používa u striedavého prúdu v elektrickej sieti. Veľkosti amplitúdy sa celkovo zhodujú s amplitúdami uvedenými v Tabuľke 11 v prílohe. Na Obrázkoch 23b a 24b je vykreslený pomer spektier signálu a šumu medzi povrchovou a vrtanou stanicou. Pomer signálov na vertikálnej zložke dosahuje hodnôt 10-20 v celom frekvenčnom rozsahu. Na horizontálnej zložke je tento pomer len o málo vyšší. Čo sa týka šumu, tak jeho pomer má hodnoty 20-30 na oboch zložkách, taktiež v celom frekvenčnom rozsahu. K väčším výchylkám došlo až na vysokej frekvencii okolo 80 Hz a na 50 Hz (elektrický prúd). SNR sa nachádza na Obrázkoch 23c a 24c. Vyššie hodnoty sú podľa očakávania na vrtnej stanici, ale až od frekvencie 5 Hz. Na 30 Hz je pomer SNR najvyšší pre obe stanice. Na vertikálnej zložke je hodnota SNR 22 na vrtnej a 6 na povrchovej stanici. Na horizontálnej zložke je to 32 na vrtnej a 13 na povrchovej stanici.

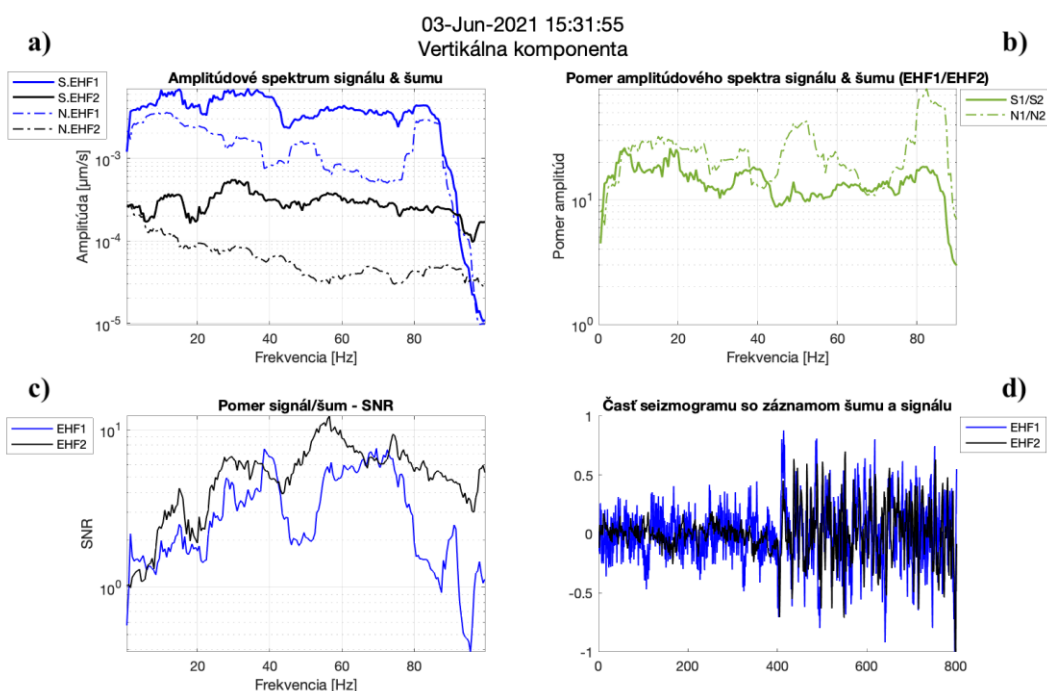


Obrázok 23: Výsledky spektrálnej analýzy na vertikálnej zložke javu z 14.05.2021. Modrá farba – EHF1 (povrch), čierna farba – EHF2 (70 m). Plná čiara značí signál (S) a prerušovaná šum (N).

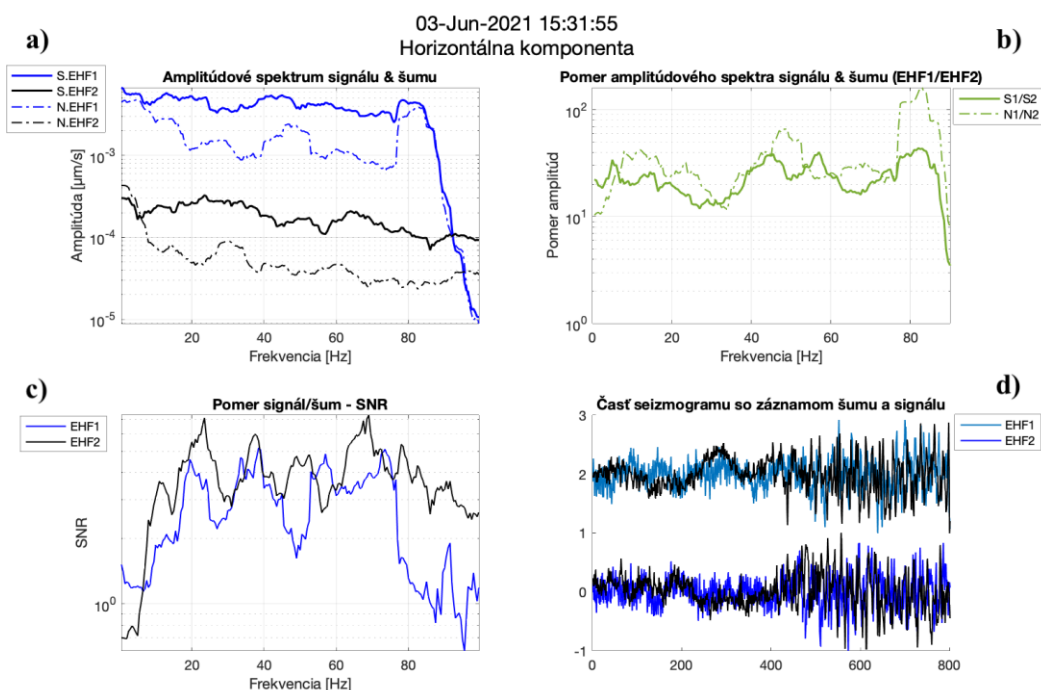


Obrázok 24: Výsledky spektrálnej analýzy na horizontálnej zložke javu z 14.05.2021. Modrá farba – EHF1 (povrch), čierna farba – EHF2 (70 m). Plná čiara značí signál (S) a prerušovaná šum (N).

Ako druhý príklad uvádzam zemetrasenie z 03.06.2021. Opäť sa jedná o zemetrasenie s epicentrom v oblasti Nového Kostela a s magnitúdom 1,6. Spektrum signálu a šumu vo vrte je približne konštantné na celom frekvenčnom rozsahu, avšak na povrchu len do 85 Hz rovnako ako u prvého javu (Nyquistova frekvencia). Hodnota spektra signálu je priemerne  $5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m/s}$  na povrchu a  $3 \cdot 10^{-4} \mu\text{m/s}$  vo vrte pre obe zložky. Amplitúdy spektra šumu majú tiež na oboch zložkách rovnaké hodnoty, a to  $2 \cdot 10^{-4} \mu\text{m/s}$  na povrchu a  $10^{-5} \mu\text{m/s}$  vo vrte (Obrázok 25a, 26a). Čo sa týka pomerov S1/S2 a N1/N2, tak tie sú konštantné na celom frekvenčnom rozsahu a vyznačujú sa len malými osciláciami. Pomery S1/S2 sa pohybujú od hodnôt 15 až 25 a pomery N1/N2 len o málo viac, približne do hodnoty 30 pre obe zložky (Obrázok 25b, 26b). Pomer signál/šum aj v tomto prípade vyšiel lepší vo vrte než na povrchu, ale až od frekvencie 5 Hz. Najvyššia hodnota SNR na vertikálnej zložke vyšla 7 pre povrchovú stanicu a 12 pre vrtnú. Na horizontálnej zložke vyšlo SNR 5 pre povrchovú a 7 pre vrtnú stanicu (Obrázok 25c, 26c). Rozdiel nie je príliš veľký a to je zapríčinené vyššími hodnotami šumu. Toho si môžeme všimnúť na časti seizmogramu na Obr. 25d a 26d. Je vidieť, že šum je v porovnaní so seizmogramom prvého javu (Obr. 23d a 24d) väčší.

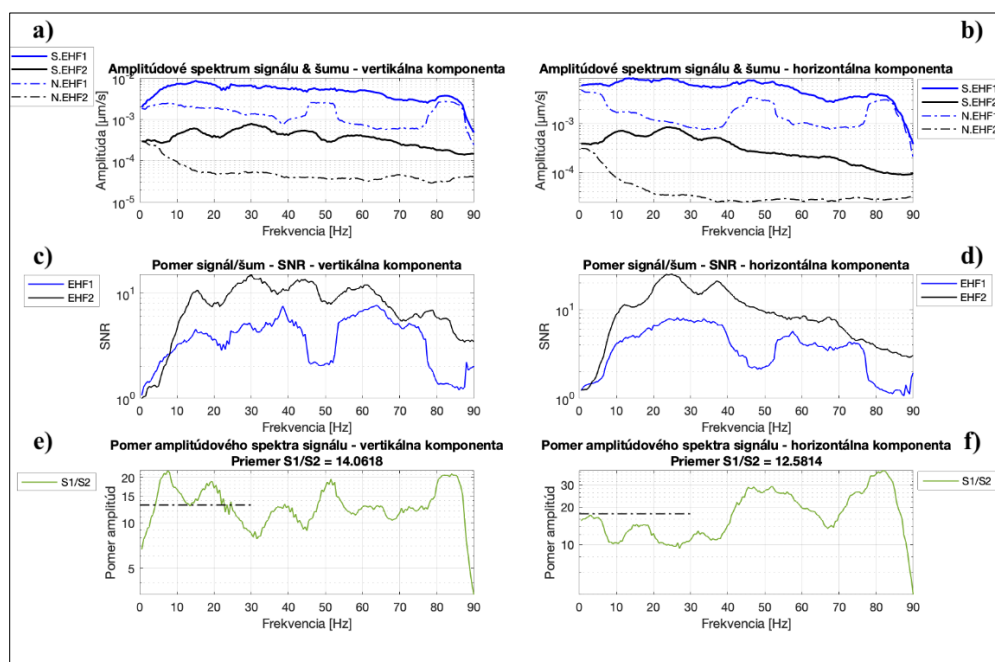


Obrázok 25: Výsledky spektrálnej analýzy na vertikálnej zložke javu z 03.06.2021. Modrá farba – EHF1 (povrch), čierna farba – EHF2 (70 m). Plná čiara značí signál (S) a prerušovaná šum (N).



Obrázok 26: Výsledky spektrálnej analýzy na horizontálnej zložke javu z 03.06.2021. Modrá farba – EHF1 (povrch), čierna farba – EHF2 (70 m). Plná čiara značí signál (S) a prerušovaná šum (N).

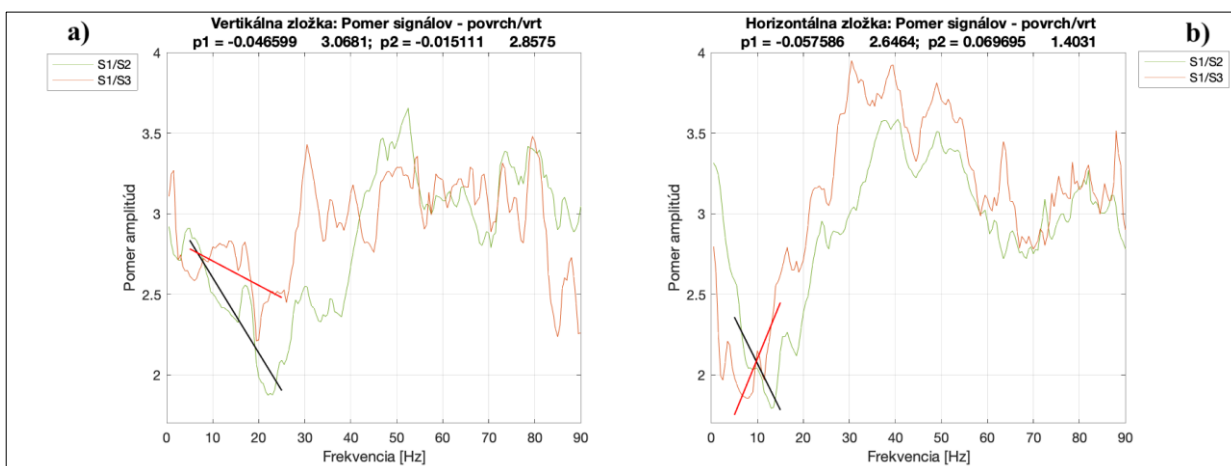
Obrázok 27 predstavuje podobne ako Obr. 22 priemerné hodnoty amplitúdových spektier a ich vzájomné pomery s použitím všetkých javov. Z grafu a) vyplýva, že na vertikálnej komponente je priemerné spektrum signálu aj šumu takmer konštantné a na celom frekvenčnom rozsahu klesá len veľmi málo. Priemerná amplitúda signálu na povrchu je  $5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m/s}$  a  $5 \cdot 10^{-4} \mu\text{m/s}$  vo vrte. Šum dosahuje hodnoty  $10^{-3} \mu\text{m/s}$  na povrchu a vo vrte  $5 \cdot 10^{-5} \mu\text{m/s}$ . Aj v tomto grafe je jasne vidieť skokový nárast amplitúdy šumu na povrchovej stanici zapríčinený striedavým prúdom v elektrickej sieti. Na grafe b) je rovnako znázornený priemer amplitúdového spektra, ale tentokrát pre horizontálnu zložku. Hodnoty signálu aj šumu sú takmer konštantné na celom rozsahu frekvencií, klesajú len mierne a ich veľkosti sa zhodujú s tými na vertikálnej zložke. Pomer signál/šum, ktorý je zobrazený na grafoch c) a d), v strede obrázku, je lepší na horizontálnej zložke. Tu dosahuje svoje maximum na frekvencii 25 Hz s hodnotami 24 na vrtnej stanici a 7 na povrchovej. Na horizontálnej zložke je SNR polovičné. Na posledných grafoch e) a f) sú vypočítané a zobrazené priemerné pomery signálov. Tie klesajú v rozpätí frekvencií od 5 Hz do 30 Hz. V porovnaní s rovnakými výsledkami z Litoměřic neklesajú tak strmo a to znamená, že v tejto geologickej oblasti v okolí vrtu dochádza k nižšiemu útlmu. Aj v tomto prípade som do grafov pridala k názornému porovnaniu prerušovanú čiaru, ktorá predstavuje výsledné zosilnenie z Tab. 5, prípadne Obr. 13a,b.



Obrázok 27: Spektrálna analýza všetkých javov s určením priemerných amplitúd. Modrá farba – EHF1 (povrch), čierna farba – EHF2 (70 m). Plná čiara značí signál (S) a prerušovaná šum (N).

### 7.3 Útlm

Na Obrázkoch 28 a 29 sa nachádzajú medzivýsledky potrebné k správne mu určení útlmu pripovrchovej vrstvy. Zlogaritmované priemerné pomery signálov na staniách v Litoměřicích a Hartoušově, ktoré sú v závislosti na frekvencii, som preložila regresnými priamkami na oboch komponentách. Čiernou čiarou sú preložené pomery S1/S2 a červenou čiarou pomery S1/S3. Na oboch zložkách som regresnú priamku obmedzila až od 5 Hz, pretože v Litoměřicích sa na povrchu nachádza 1 Hz snímač a vo vrte 4,5 Hz. V prípade snímačov v Hartoušově by sa mali kvôli ich parametrom brať v potaz frekvencie väčšie ako 1 Hz, ale kvôli lepšiemu preloženiu priamkou som ju aj v tomto prípade obmedzila až od 5 Hz. Dáta z Litoměříc som na vertikálnej zložke preložila priamkou do frekvencie 25 Hz a na horizontálnej do 15 Hz. Dáta z Hartoušova som však na oboch komponentách preložila do 30 Hz. Tieto hodnoty frekvencií som vybrala z dôvodu, aby smernice regresných priamok boli záporné, a teda priamky prechádzali dátami, ktorých hodnota na danom frekvenčnom rozsahu klesá. Rovnako som sa snažila o čo najlepšie možné preloženie priamky dátami. V grafoch sú vypísané smernice všetkých priamok značené ako  $p$  a čísla vedľa nich predstavujú absolútne členy. Sú výsledkom funkcie *polyfit* v Matlabe. Ako môžeme vidieť na Obr. 28a, teda na vertikálnej zložke, tak regresia týmito dátami bola úspešná a výsledné hodnoty smerníc sú záporné. Pre pomer S1/S2 vyšlo  $p_1 = -0,466$  a pre S1/S3 je  $p_2 = -0,015$ . Na Obr. 28b, na horizontálnej zložke, vyšla záporná smernica len pre čiernu priamku preloženú dátami S1/S2, a to  $p_1 = -0,057$ . Pre druhú priamku, červenú, vyšla smernica s kladnou hodnotou  $p_2 = 0,069$  a to znamená, že z takýchto dát nie je možné určiť útlm.



Obrázok 28: Litoměřice - Logaritmus pomeru signálov v závislosti na frekvencii s vykreslenou regresnou priamkou na vertikálnej (a) a horizontálnej zložke (b). Priamkou čiernej farby sú preložené hodnoty  $S1/S2$  a červenou farbou hodnoty  $S1/S3$ .

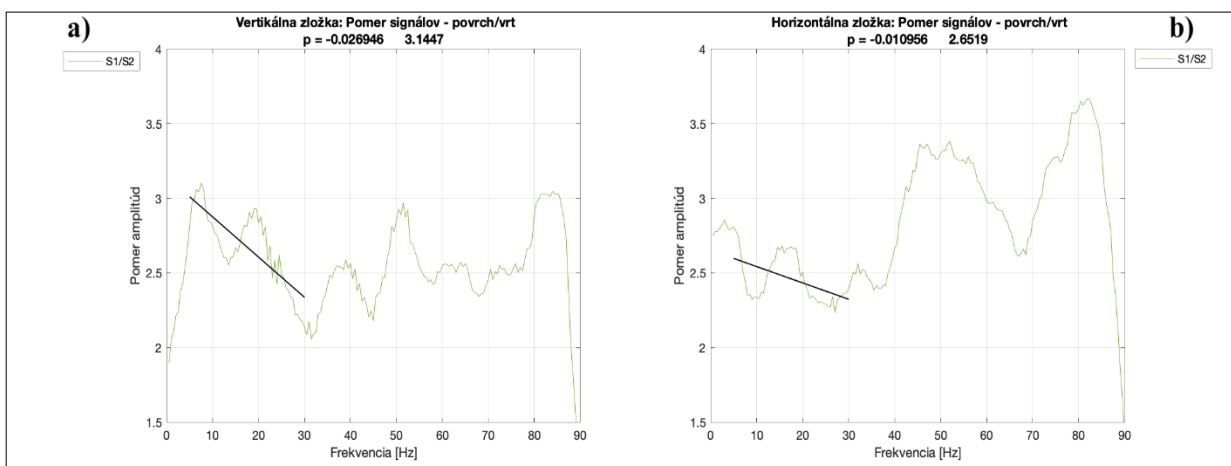
V Tabuľke 8 sú vypočítané rozdiely časov prechodu seizmického paprsku od snímača vo vrte k snímaču na povrchu. Následne som dosadením získanej smernice priamky do vzorca 33 určila operátor útlmu  $t^*$ . Touto hodnotou som vydělila rozdiely časov  $t_1-t_2$  a  $t_1-t_3$  podľa vzorca 24. Výsledkom sú hodnoty faktoru kvality  $Q1$  a  $Q2$  pre každý jav. Keďže som priamku prekladala priemernými hodnotami pomerov signálu, tak aj útlm som nakoniec vypočítala ako priemer zo všetkých hodnôt. Na vertikálnej zložke vyšiel útlm pripovrchovej vrstvy medzi sanicami GLT2 a GLT1, teda medzi plytkou a povrchovou stanicou, 12,35. Medzi hlbokou stanicou GLT1 a povrchovou stanicou GTCLT vyšiel útlm 67,53. To znamená, že vlny prechádzajúce hlbšie uloženým kryštalynikom sú menej utlmené, než vlny pozorované prechádzajúce prostredím tvoreným sedimentami. Keďže hustota a rýchlosť šírenia seizmických vln je v kryštalyniku väčšia, tak aj jeho faktor kvality  $Q$  bude mať väčšiu hodnotu než v prostredí tvorenom len sedimentami. Na horizontálnej zložke bolo možné určiť len  $Q1$  v prostredí medzi plytkou a povrchovou stanicou. Jeho hodnota vyšla 10 a to znamená, že v porovnaní s vertikálou sú seizmické vlny v pripovrchovej vrstve viac utlmené. Je však dôležité pripomenúť, že na vertikálnej zložke sa jedná o útlm určený vo frekvenčnom pásme od 5 Hz až 25 Hz a na horizontálnej zložke od 5 Hz do 15 Hz.



Tabuľka 8: Výsledné hodnoty časov prechodu seizmického paprsku od vrtnej stanice GLT2 k povrchovej stanici GTCT ( $t_1-t_2$ ), od vrtnej stanice GLT1 ku GTCLT ( $t_1-t_3$ ) a určené hodnoty útlmu pripovrchovej vrstvy Q1 a Q2 na vertikálnych a horizontálnych zložkách.

| Dátum      | $t_1-t_2$      | $t_1-t_3$ | Vertikálna zložka |       | Horizontálna zložka |    |
|------------|----------------|-----------|-------------------|-------|---------------------|----|
|            | [s]            | [s]       | Q1                | Q2    | Q1                  | Q2 |
| 03.12.2020 | 0,175          |           | 11,79             |       | 9,54                |    |
| 20.02.2021 | 0,165          |           | 11,12             |       | 9,00                |    |
| 22.02.2021 | 0,16           |           | 10,78             |       | 8,72                |    |
| 23.02.2021 | 0,145          |           | 9,77              |       | 7,91                |    |
| 27.02.2021 | 0,225          |           | 15,16             |       | 12,27               |    |
| 11.04.2021 | 0,21           |           | 14,15             |       | 11,45               |    |
| 04.03.2021 | 0,2            |           | 13,48             |       | 10,91               |    |
| 17.03.2021 | 0,235          |           | 15,84             |       | 12,81               |    |
| 05.05.2021 | 0,175          | 0,325     | 11,79             | 67,53 | 9,54                | /  |
| 09.05.2021 | 0,165          | 0,33      | 11,12             | 68,57 | 9,00                | /  |
| 16.06.2021 | 0,16           | 0,28      | 10,78             | 58,18 | 8,72                | /  |
| 18.06.2021 | 0,185          | 0,365     | 12,47             | 75,85 | 10,09               | /  |
|            | <b>Priemer</b> |           |                   |       |                     |    |
|            | 0,183          | 0,325     | 12,35             | 67,53 | 10,00               | /  |

V prípade Hartoušova (Obrázok 29), vyšli hodnoty smerníc regresných priamok záporné na oboch zložkách. Určené boli v rozsahu frekvencií od 5 do 30 Hz. Na vertikálnej zložke je veľkosť smernice  $p=-0,027$  a na horizontálnej zložke je  $p=-0,011$ . V Tab. 9 sú určené časy prechodu seizmického paprsku od stanice vo vrte k stanici na povrchu a rovnakým spôsobom ako v Litoměřicích je určený faktor kvality Q. Na vertikálnej zložke vyšla jeho veľkosť 7,19 a na horizontálnej zložke 17,67. To znamená, že vlny sú po prechode týmto geologickým prostredím viac utlmené na vertikálnej zložke než na horizontálnej.



Obrázok 29: Hartoušov - Logaritmus pomeru signálov v závislosti na frekvencii s vykreslenou regresnou priamkou na vertikálnej (a) a horizontálnej zložke (b).

Tabuľka 9: Výsledné hodnoty časov priechodu seizmického paprsku od vrtnej stanice EHF2 k povrchovej stanici EHF1 ( $t_1-t_2$ ) a určené hodnoty útlmu pripovrchovej vrstvy  $Q$  na vertikálnej a horizontálnej zložke.

| Dátum      | $t_1-t_2$      | Vertikálna zložka | Horizontálna zložka |
|------------|----------------|-------------------|---------------------|
|            | [s]            | $Q$               | $Q$                 |
| 06.05.2021 | 0,060          | 6,99              | 17,20               |
| 06.05.2021 | 0,060          | 6,99              | 17,20               |
| 14.05.2021 | 0,060          | 6,99              | 17,20               |
| 27.05.2021 | 0,065          | 7,57              | 18,63               |
| 03.06.2021 | 0,060          | 6,99              | 17,20               |
| 06.07.2021 | 0,065          | 7,57              | 18,63               |
|            | <b>Priemer</b> |                   |                     |
|            | 0,062          | 7,19              | 17,67               |

## 8 Diskusia

Pri vyhodnocovaní výsledkov sa potvrdilo, že veľkosť amplitúdy s hĺbkou klesá. Môžeme to pozorovať na výsledkoch RMS amplitúd a tiež spektrálnej analýzy. Ak porovnáme výsledky, tak veľkosti RMS amplitúd odpovedajú veľkostiam amplitúd v spektrálnej analýze do 30 Hz. Na tomto frekvenčnom rozsahu má signál najväčšiu energiu a aj preto som pri určovaní útlmu obmedzila frekvencie práve do 30 Hz maximálne. Ak sa zameriame na pomery signálov a ich priemernú hodnotu do tejto frekvencie, tak zistíme, že signál je na povrchu zosilnený na vertikálnej zložke 12x v porovnaní so signálom na stanici GLT2 a 15x v porovnaní s GLT1 (Obr. 22e). Rovnaké hodnoty zosilnenia, ilustrované na Obrázku 12a, vyšli aj zo spracovania RMS amplitúd. Na horizontálnej zložke sa však už mierne líšia. Zo spektrálnej analýzy vyplýva to, že signál je zosilnený 13x v porovnaní s GLT2 a 16x s GLT1 (Obrázok 22f). Teoretické zosilnenie signálu zistené pomocou RMS amplitúd je 10,5x a 7,5x na povrchu (Obrázok 12b). Za tento rozdiel môže veľmi nízky pomer signálov, najmä  $S1/S3$ , ktorý klesá do 10 Hz takmer k nule. V Hartoušovej sa zosilnenia na vertikálnej zložke takmer rovnajú, ale výraznejšie sa líšia pre horizontálnu zložku. Výsledkom spektrálnej analýzy je zosilnenie signálu na povrchu 12,5x (Obrázok 27f) a 17,7x zo strednej hodnoty amplitúd (Obrázok 13b). Aj v tomto prípade je pomer signálov a jeho priemer určený do frekvencie 30 Hz nižší, než ten teoretický. K tomu aby zosilnenie vyšlo rovnaké, by bolo potrebné obmedziť frekvenciu aspoň na 20 Hz.

Ďalším faktorom ovplyvňujúcim výsledky je použitie seizmometrov s rôznym frekvenčným rozsahom na povrchu a vo vrte. Tento rozdiel je najlepšie pozorovaný pri určovaní útlmu, kedy vôli tomu bolo nutné obmedziť frekvencie od 5 Hz. V prípade, že som brala v potaz aj menšie frekvencie, tak určenie útlmu nebolo jednoznačné, konkrétne na vrtných staniách v Litoměřicih, pretože sa tu nachádzajú 4,5 Hz geofony.

Pri určovaní útlmu pripovrchovej vrstvy podľa práce Wang et al. (2016) sa vo výsledkoch potvrdilo, že logaritmus spektrálneho pomeru signálov má lineárny charakter. To vedie k úvahám, že v pripovrchovej vrstve je  $Q$  málo frekvenčne závislé v rozmedzí od 5 až 30 Hz. Túto teóriu v svojich prácach potvrdili napríklad aj Abercrombie (1997) alebo Hauksson et al. (1987). Výsledky neboli viditeľne silno ovplyvnené iným rozložením seizmických staníc, než aké použil v práci Wang et al (2016). V ich prípade bol vrtný a

povrchový snímač priamo nad sebou. Samozrejme to malo vplyv pri určovaní časov prechodu seizmickej vlny od vrtného snímača k povrchu, ale vzdialenosti medzi jednotlivými stanicami v Litoměřicích a v Hartoušově nie sú príliš veľké.

Zaujímavé je porovnanie výsledného útlm pripovrchovej vrstvy tvorenej sedimentami v Hartoušově a Litoměřicích. Ak porovnáme výsledné  $Q$  na vertikálnych zložkách (12–Litoměřice, 7–Hartoušov), tak môžeme tvrdiť, že ílovité prostredie v ktorom sa nachádza stanica EHF2 utlmí seizmickú vlnu viac než prostredie tvorené morskými a kontinentálnymi sedimentami. Avšak presne naopak je tomu na horizontálnej zložke, kde výsledná hodnota  $Q$  vyšla nižšia v Litoměřicích (10) než v Hartoušově (17,6). To môže byť spôsobené tým, že sa stanica GLT2 nachádza o 120 m hlbšie ako stanica EHF2, rôznymi lokálnymi podmienkami alebo rôznym rozložením seizmických staníc.

## 9 Záver

Prvým z cieľov tejto práce bolo posúdiť výhody a prínosy vrtných seizmometrov pri zaznamenávaní seizmických javov a zvýšenie citlivosti monitorovania. Motiváciou k tomu boli nové inštalácie vrtných seizmometrov v Českej republike. Záznamy z vrtných staníc majú lepšie pomery signálu a šumu vďaka tomu, že šum je zo záznamu s narastajúcou hĺbkou viac odfiltrovaný. Odhliadnuc od pár výnimiek v prípade určovania SNR spôsobených nestacionaritou šumu sa ukázalo, že takéto monitorovanie seizmickej aktivity môže priniesť lepšie a zaujímavé výsledky. Tento fakt sa potvrdil s využitím metódy spektrálnych pomerov ako aj teoretickým využitím RMS amplitúd. Ďalším výsledkom a cieľom práce bolo ukázať vplyv voľného povrchu na veľkosti amplitúd a pochopenie a upresnenie vplyvu pripovrchovej vrstvy. To viedlo k určeniu zosilnenia signálu a šumu na povrchu. Vďaka možnosti porovnať výsledky z Litoměřic a Hartoušova sa ukázalo, že veľkosť zosilnenia je ovplyvnená lokálnou geológiou. Zo spektrálnej analýzy zas, že jeho veľkosť sa mení v závislosti na frekvencii. Celkom novým výsledkom je určenie útlmu pripovrchovej vrstvy. Motiváciou k tomu bolo to, že na túto tému neboli v lokalite západných Čiech ani Litoměřic publikované žiadne štúdie. Táto práca je prvou, ktorá k tomu využila monitorovacie seizmické vrty so snímačmi v rôznych hĺbkových úrovniach a v rôznom geologickom prostredí. Východiskom k spôsobu určenia útlmu bola metóda spektrálnych pomerov. Ukázalo sa, že útlm v prostredí kryštalinika je menší ako v prostredí tvorenom sedimentami a závisí od lokálnych podmienok. Ten bolo možné určiť vďaka tomu, že logaritmus signálov mal lineárny charakter v rozmedzí frekvencií 5 až 30 Hz.

## 10 Zoznam použitých zdrojov

Abercrombie, R.E., 1997. Near-surface attenuation and site effects from comparison of surface and deep borehole recordings. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 87, 731–744.

Aki, K., Richards, P.G., 2002. *Quantitative Seismology*, 2nd Ed.

Bachura, M., Fischer, T., 2016. Coda Attenuation Analysis in the West Bohemia/Vogtland Earthquake Swarm Area. *Pure Appl. Geophys.* 173, 425–437. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1137-3>

Bankwitz, P., Schneider, G., Kämpf, H., Bankwitz, E., 2003. Structural characteristics of epicentral areas in Central Europe: study case Cheb Basin (Czech Republic). *J. Geodyn.* 35, 5–32. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(02\)00051-0](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00051-0)

Bormann, P., Engdahl, B., Kind, R., 2012. Seismic Wave Propagation and Earth models. *New Man. Seismol. Obs. Pract.* 2 NMSOP2 1–105. [https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2\\_ch2](https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch2)

Bussert, R., Kämpf, H., Flechsig, C., Hesse, K., Nickschick, T., Liu, Q., Umlauf, J., Vylita, T., Wagner, D., Wonik, T., Flores Estrella, H., Alawi, M., 2017. Drilling into an active mofette: pilot-hole study of the impact of CO<sub>2</sub>-rich mantle-derived fluids on the geo-bio interaction in the western Eger Rift (Czech Republic). *Sci. Drill.* 23, 13–27. <https://doi.org/10.5194/sd-23-13-2017>

Dalton, C.A., Ekström, G., 2006. Global models of surface wave attenuation. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 111. <https://doi.org/10.1029/2005JB003997>

Dalton, C.A., Ekström, G., Dziewoński, A.M., 2008. The global attenuation structure of the upper mantle. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JB005429>

Fischer, T., Horálek, J., Hrubcová, P., Vavryčuk, V., Bräuer, K., Kämpf, H., 2014. Intra-continental earthquake swarms in West-Bohemia and Vogtland: A review. *Tectonophysics* 611, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.11.001>

Hauksson, E., Teng, T., Henyey, T.L., 1987. Results from a 1500 m deep, three-level downhole seismometer array: Site response, low Q values, and f<sub>max</sub>. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 77, 1883–1904. <https://doi.org/10.1785/BSSA0770061883>

Havskov, J., Ottemoller, L., 2010. Routine Data Processing in Earthquake Seismology: With Sample Data, Exercises and Software. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8697-6>

Heimann, S., Kriegerowski, M., Isken, M., Cesca, S., Daout, S., Grigoli, F., Juretzek, C., Megies, T., Nooshiri, N., Steinberg, A., Sudhaus, H., Vasyura-Bathke, H., Willey, T., Dahm, T., 2017. Pyrocko - An open-source seismology toolbox and library. <https://doi.org/10.5880/GFZ.2.1.2017.001>

Lay, T., Wallace, T.C. (Eds.), 1995. Chapter 4 - Surface Waves and Free Oscillations, in: International Geophysics, Modern Global Seismology. Academic Press, pp. 116–172. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(05\)80005-1](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(05)80005-1)

MLčoch, B., Konopasek, J., 2010. Pre-Late Carboniferous geology along the contact of the Saxothuringian and Teplá-Barrandian zones in the area covered by younger sediments and volcanics (western Bohemian Massif, Czech Republic). J. Geosci. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.068>

Šafanda, J., Verner, K., Franěk, J., Peřestý, V., Holeček, J., Fischer, T., 2020. Geology and geothermal potential in the eastern flank of Eger Rift (Litoměřice area, Czech Republic). Geothermics 86, 101808. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101808>

Shapiro, S.A., Kneib, G., 1993. Seismic Attenuation By Scattering: Theory and Numerical Results. Geophys. J. Int. 114, 373–391. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb03925.x>

Shearer, P.M., 2019. Introduction to Seismology [WWW Document]. High. Educ. Camb. Univ. Press. <https://doi.org/10.1017/9781316877111>

Shearer, P.M., 2009. Introduction to Seismology, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841552>

Shearer, P.M., Orcutt, J.A., 1987. Surface and near-surface effects on seismic waves—theory and borehole seismometer results. Bull. Seismol. Soc. Am. 77, 1168–1196. <https://doi.org/10.1785/BSSA0770041168>

Stein, S., Wysession, M., 2003. An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. Blackwell Publishing Ltd.

Udías, A., 2000. Principles of Seismology. Cambridge University Press, Cambridge.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139164306>

Wang, Y.-J., Ma, K.-F., Wu, S.-K., Hsu, H.-J., Hsiao, W.-C., 2016. Near-Surface Attenuation and Velocity Structures in Taiwan from Wellhead and Borehole Recordings Comparisons. Terr. Atmospheric Ocean. Sci. 27, 169.  
[https://doi.org/10.3319/TAO.2015.10.07.01\(T\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2015.10.07.01(T))

Wcisło, M., Eisner, L., Málek, J., Fischer, T., Vlček, J., Kletetschka, G., 2018. Attenuation in West Bohemia: Evidence of High Attenuation in the Nový Kostel Focal Zone and Temporal Change Consistent with CO<sub>2</sub> Degassing. Bull. Seismol. Soc. Am. 108, 450–458.  
<https://doi.org/10.1785/0120170168>

Yang, Y., Forsyth, D.W., 2008. Attenuation in the upper mantle beneath Southern California: Physical state of the lithosphere and asthenosphere. J. Geophys. Res. 113, 1–12.  
<https://doi.org/10.1029/2007JB005118>



## 11 Prílohy

Tabuľka 10: RMS amplitúdy signálu a šumu na horizontálnych a vertikálnych zložkách na jednotlivých staniciach v Litoměřcích.

|            | GTCLT (povrch)    |                   | GLT2 (190 m)      |                   | GLT1 (1500 m)     |                   |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Dátum      | RMS<br>Z – šum    | RMS<br>H – šum    | RMS<br>Z – šum    | RMS<br>H – šum    | RMS<br>Z – šum    | RMS<br>H – šum    |
| 05.10.2020 | 2,23E-01          | 4,22E-01          | 2,53E-02          | 1,69E-02          |                   |                   |
| 19.11.2020 | 2,20E-01          | 4,80E-01          | 1,00E-02          | 8,60E-03          |                   |                   |
| 03.12.2020 | 3,88E-01          | 7,29E-01          | 1,77E-02          | 1,38E-02          |                   |                   |
| 11.02.2021 | 1,57E-01          | 2,95E-01          | 8,81E-03          | 5,81E-03          |                   |                   |
| 20.02.2021 | 1,17E-01          | 1,82E-01          | 6,52E-03          | 5,00E-03          |                   |                   |
| 22.02.2021 | 1,24E-01          | 1,94E-01          | 6,37E-03          | 6,06E-03          |                   |                   |
| 23.02.2021 | 8,28E-02          | 1,23E-01          | 3,67E-03          | 3,59E-03          |                   |                   |
| 27.02.2021 | 1,57E-01          | 2,04E-01          | 6,94E-03          | 5,55E-03          |                   |                   |
| 11.04.2021 | 1,54E-01          | 2,76E-01          | 1,81E-02          | 1,43E-02          |                   |                   |
| 11.04.2021 | 9,46E-02          | 1,62E-01          | 9,16E-03          | 8,47E-03          |                   |                   |
| 11.04.2021 | 8,62E-02          | 1,01E-01          | 6,40E-03          | 7,37E-03          |                   |                   |
| 04.03.2021 | 1,70E-01          | 4,94E-01          | 1,10E-02          | 1,10E-02          |                   |                   |
| 17.03.2021 | 7,60E-02          | 1,20E-01          | 5,50E-03          | 4,28E-03          |                   |                   |
| 05.05.2021 | 1,20E-01          | 2,37E-01          | 1,60E-02          | 1,45E-02          | 6,80E-03          | 5,04E-03          |
| 09.05.2021 | 1,10E-01          | 2,08E-01          | 6,40E-03          | 9,74E-03          | 3,00E-03          | 3,68E-03          |
| 08.06.2021 | 6,80E-02          | 1,03E-01          | 3,20E-03          | 4,80E-03          | 3,80E-03          | 7,37E-03          |
| 16.06.2021 | 4,60E-01          | 4,00E-01          | 1,60E-02          | 1,30E-02          | 9,10E-03          | 9,75E-03          |
| 18.06.2021 | 8,00E-02          | 1,53E-01          | 4,70E-03          | 6,68E-03          | 4,70E-03          | 6,59E-03          |
|            | GTCLT             |                   | GLT2              |                   | GLT1              |                   |
| Dátum      | RMS<br>Z - signál | RMS<br>H - signál | RMS<br>Z - signál | RMS<br>H - signál | RMS<br>Z - signál | RMS<br>H - signál |
| 05.10.2020 | 1,38E+00          | 1,51E+00          | 2,17E-01          | 3,65E-01          |                   |                   |
| 19.11.2020 | 3,40E+00          | 1,94E+00          | 2,20E-01          | 3,19E-01          |                   |                   |
| 03.12.2020 | 1,47E+00          | 9,63E-01          | 1,05E-01          | 8,79E-02          |                   |                   |
| 11.02.2021 | 2,31E-01          | 3,40E-01          | 1,38E-02          | 8,15E-03          |                   |                   |
| 20.02.2021 | 7,49E-01          | 5,58E-01          | 4,34E-02          | 5,04E-02          |                   |                   |
| 22.02.2021 | 5,59E-01          | 3,50E-01          | 3,36E-02          | 3,80E-02          |                   |                   |
| 23.02.2021 | 4,26E-01          | 2,64E-01          | 2,14E-02          | 2,50E-02          |                   |                   |
| 27.02.2021 | 4,38E-01          | 2,48E-01          | 2,63E-02          | 3,62E-02          |                   |                   |
| 11.04.2021 | 7,06E-01          | 5,95E-01          | 1,24E-01          | 1,16E-01          |                   |                   |
| 11.04.2021 | 1,95E-01          | 1,90E-01          | 3,01E-02          | 2,45E-02          |                   |                   |

|            |          |          |          |          |          |          |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 11.04.2021 | 1,46E-01 | 9,53E-02 | 1,67E-02 | 1,34E-02 |          |          |
| 04.03.2021 | 6,90E-01 | 6,29E-01 | 6,30E-02 | 4,28E-02 |          |          |
| 17.03.2021 | 1,90E+00 | 6,93E-01 | 1,90E-01 | 9,17E-02 |          |          |
| 05.05.2021 | 1,80E+00 | 1,03E+00 | 2,20E-01 | 1,71E-01 | 1,30E-01 | 9,54E-02 |
| 09.05.2021 | 3,20E-01 | 2,65E-01 | 4,10E-02 | 2,97E-02 | 2,00E-02 | 3,59E-02 |
| 08.06.2021 | 2,20E-01 | 1,30E-01 | 1,90E-02 | 1,30E-02 | 1,80E-02 | 2,10E-02 |
| 16.06.2021 | 2,90E+00 | 1,69E+00 | 1,90E-01 | 1,48E-01 | 1,60E-01 | 2,50E-01 |
| 18.06.2021 | 3,10E-01 | 2,20E-01 | 2,20E-02 | 2,09E-02 | 2,40E-02 | 3,26E-02 |

Tabuľka 11: RMS amplitúdy signálu a šumu na horizontálnych a vertikálnych zložkách na povrchovej a vrtnej stanici v Hartoušovej.

| Dátum      | EHF1 (povrch)     |                   | EHF2 (70 m)       |                   |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|            | RMS<br>Z - šum    | RMS<br>H - šum    | RMS<br>Z - šum    | RMS<br>H - šum    |
| 14.05.2021 | 1,90E-02          | 2,06E-02          | 6,70E-04          | 6,34E-04          |
| 27.05.2021 | 1,70E-02          | 2,14E-02          | 6,00E-04          | 5,15E-04          |
| 03.06.2021 | 1,80E-02          | 1,84E-02          | 6,50E-04          | 7,66E-04          |
| 06.05.2021 | 1,60E-02          | 2,05E-02          | 5,70E-04          | 6,29E-04          |
| 06.05.2021 | 1,60E-02          | 1,85E-02          | 5,70E-04          | 6,27E-04          |
| 06.07.2021 | 1,50E-02          | 1,70E-02          | 5,50E-04          | 6,08E-04          |
| Dátum      | EHF1 (povrch)     |                   | EHF2 (70 m)       |                   |
|            | RMS<br>Z - signál | RMS<br>H - signál | RMS<br>Z - signál | RMS<br>H - signál |
| 14.05.2021 | 4,10E-02          | 7,59E-02          | 3,20E-03          | 3,73E-03          |
| 27.05.2021 | 2,20E-02          | 3,77E-02          | 1,40E-03          | 1,65E-03          |
| 03.06.2021 | 3,30E-02          | 3,15E-02          | 2,30E-03          | 1,45E-03          |
| 06.05.2021 | 5,20E-02          | 7,15E-02          | 4,10E-03          | 4,53E-03          |
| 06.05.2021 | 9,70E-02          | 1,35E-01          | 8,50E-03          | 9,09E-03          |
| 06.07.2021 | 3,30E-02          | 3,46E-02          | 2,80E-03          | 3,28E-03          |